

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra mechanické technologie**

**Aplikace mikroprutových struktur  
a bionických prvků na rukojeť luku**

**Application of Lattice Structures  
and Bionic Design for Bow Handle**

Student:  
Vedoucí diplomové práce:

Bc. Libor Polách  
Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Ostrava 2019

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Libor Polách**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: Aplikace mikroprutových struktur a bionických prvků pro rukojeť luku  
Application of Lattice Structures and Bionic Design for Bow Handle  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Současný stav.
3. Návrh mikroprutové struktury a bionických prvků.
4. Technické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


DOBBS, Sarah et al. SB LTD. The Ultimate Guide To 3D Printing. London: Dennis Publishing Ltd, 2014, 48 s. ISBN 1-78106-309-5.  
GIBSON, I., D. W ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.  
BATEMAN, Rob a Richard OLSSON. The essential guide to 3D in Flash. Berkeley, California?: Friends of Ed, [2010]. ISBN 978-1-4302-2542-6.  
HAUSMAN, Kalani Kirk a Richard HORNE. 3D Printing for dummies. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, [2014]. For dummies. ISBN 978-1-118-66075-1.

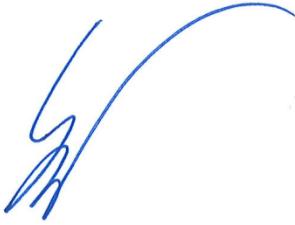
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019

.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem si vědom, že na tuto moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019

.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Libor Polách

Adresa trvalého pobytu autora práce: Jevíčko 569 43, Brezinky 36



## Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Marku Pagáčovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za maximální podporu a také Centru podpory inovací VŠB, především laboratoři ProtoLab za plnou spolupráci.

Diplomová byla vypracována v rámci projektu: „Moderní a produktivní obrábění a metrologie“, reg. č. „SP2019/60“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Polách, L. *Aplikace mikroprutových struktur a bionických prvků na rukojeť luku*: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 68 s. Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá problematikou aplikace mikroprutových struktur a bionických prvků ve spojení s aditivní výrobou a topologickou optimalizací. První část je věnována teoretickému rozboru dané problematiky. Druhá část práce se zabývá procesem návrhu vlastní optimalizované konstrukce. Vytvořený model byl zhotoven pomocí 3D tiskové technologie SLS (Selective Laser Sintering), přesněji strojem EOS P 396. Jako stavební materiál byl vybrán polyamidový prášek s výrobním označením PA 2200. Závěr práce je věnován samotnému technologickému a ekonomickému zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova: aditivní výroba, topologická optimalizace, mikroprutové struktury, bionické prvky

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

Polách, L. *Application of Lattice Structures and Bionic Design for Bow Handle*: master thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, p. 68 Master thesis, head: Ing Marek Pagáč, Ph.D.

Master thesis deals with a problem of lattice structures application and bionic designs application, connected with an additive manufacturing and topology optimization. First part is mainly theoretical analysis of the issue, second part is about design process of my own optimized construction. The model was made by 3D printing laser technology SLS (Selective Laser Sintering), exactly by EOS P 396 machine. As a building material was chosen a polyamide powder, production key PA 2200. The conclusion of master thesis is based on a comparing the achieved results in terms of technological and economic view.

Key words: Additive Manufacturing, Topology Optimization, Lattice Structures, Bionic Design

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

AT	Aditivní technologie	[-]
AV	Aditivní výroba	[-]
RP	Rapid Prototyping	[-]
2D	Dvojměrný prostor	[-]
3D	Trojměrný prostor	[-]
SLA	Stereolithography	[-]
BPM	Ballistic Particle Manufacturing	[-]
LOM	Laminated Object Manufacturing	[-]
SGC	Solid Grounding Curing	[-]
SLS	Selective Laser Sintering	[-]
FDM	Fused Deposition Modeling	[-]
MJF	Multi Jet Fusion process	[-]
DLP	Digital Light Processing	[-]
APF	Arburg Plastic Freeforming	[-]
SLM	Selective Laser Melting	[-]
CAD	Computer Aided Design	[-]
ABS	Akrylonitril butadien styren	[-]
PLA	Poly Lactic Acid	[-]
PC	Polykarbonát	[-]
PET	Polyethylentereftalát	[-]
HIPS	High impact polystyrene	[-]
PVA	Polyvinylalkohol	[-]
TPU	Thermoplastic polyurethane	[-]
TPE	Thermoplastic elastomers	[-]
PA-GF	Sklem plněný polyamid	[-]
CVD	Chemical Vapour Deposition	[-]
PVD	Physical Vapour Deposition	[-]

# OBSAH

Seznam použitých značek a symbolů.....	7
ÚVOD .....	10
1 TEORETIVKÁ ČÁST .....	11
1.1 Historie 3D tisku.....	11
1.2 Technologie 3D tisku.....	13
1.2.1 LOM.....	14
1.2.2 MJF .....	15
1.2.3 SLA, DLP.....	16
1.2.4 PolyJet.....	18
1.2.5 FDM, APF.....	20
1.2.6 SLS, SLM.....	22
1.3 Výrobní proces aditivních technologií.....	24
1.3.1 Preprocessing.....	25
1.3.2 Processing .....	27
1.3.3 Postprocessing.....	27
1.4 Materiály.....	28
1.4.1 Základní druhy plastových materiálů.....	29
1.4.2 Práškové materiály .....	32
1.4.3 Fotopolymery .....	36
1.5 Konečné úpravy modelů vytvořených AV.....	37
1.5.1 Omílání.....	37
1.5.2 Tryskání .....	37
1.5.3 Lepení .....	38
1.5.4 Broušení .....	38
1.5.5 Lešetění .....	38
1.5.6 Lakování .....	39
1.5.7 Povlakování .....	39
1.6 Optimalizace konstrukce.....	40
1.6.1 Rozměrová optimalizace.....	41
1.6.2 Tvarová optimalizace .....	41
1.6.3 Topologická optimalizace .....	42
1.6.4 Porovnání optimalizačních metod .....	45

1.6.5 Bionické prvky .....	45
1.6.6 Mikroptutová soustava .....	47
1.6.7 Počítačové softwary pro optimalizace .....	48
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>49</b>
<b>2.1 Rozbor zadání .....</b>	<b>49</b>
<b>2.2 Modelování .....</b>	<b>50</b>
2.2.1 Výstavba základního 3D modelu.....	50
2.2.2 Aplikace 3D textury na rukojeť luku .....	53
2.2.3 Aplikace mikroptutových prvků.....	55
<b>2.3 Vlastní proces tisku.....</b>	<b>58</b>
<b>2.4 Lakování.....</b>	<b>59</b>
<b>2.5 Technické zhodnocení.....</b>	<b>62</b>
<b>3 ZÁVĚR.....</b>	<b>63</b>
<b>4 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>64</b>
<b>5 SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>67</b>

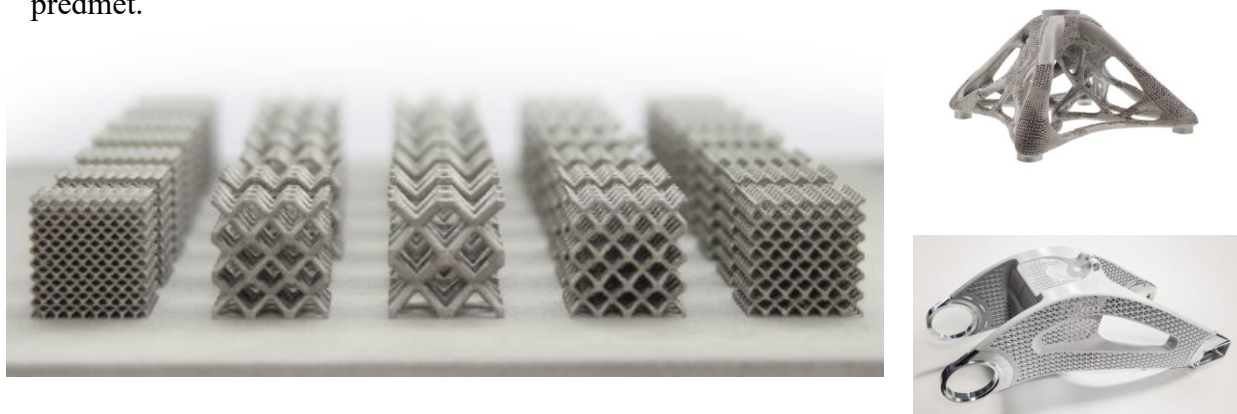
## ÚVOD

Již od minulosti lidstvo doprovází snaha o zdokonalení a především ulehčení odváděné práce. Díky tomu máme dnes k dispozici velké množství technologií. Řada z nich nese s sebou určité klady a zápory, které je nutno důkladně zvážit při samotném návrhu výroby.

Mezi tyto technologie výroby neodmyslitelně patří i 3D tisk neboli aditivní výroba. Jedná se o relativně mladou technologii (s porovnáním s ostatními konvenčními technologiemi), která byla představena veřejnosti na konci 80. let jako Rapid Prototyping. Během posledních dvou desetiletí však došlo k jejímu značnému rozvoji. Mohou za to především její nesporné výhody, které tato metoda přinesla do výrobního průmyslu.<sup>[4]</sup>

Výraz aditivní výroba (česky přídavná) odkazuje k tomu, že všechny tyto procesy zahrnují výrobu s postupným přidáváním materiálu na rozdíl od konvenčních výrobních strojů, jako jsou například soustruhy, frézky a vrtačky, které vytvářejí výsledné výrobky postupným odebráním materiálu z původního polotovaru. Jedním z klíčových přínosů aditivní výroby tak je „virtuální likvidace odpadních materiálů, což přináší volnost při tvorbě designu bez omezení plynoucích z použití právě tradičních procesů, jako je třeba řezání, frézování nebo vrtání.“<sup>[5]</sup>

Možnosti využití 3D tisku jsou opravdu rozsáhlé. Najde své uplatnění například v medicíně, v oblasti designu, v leteckém či automobilovém průmyslu. V poslední době patří mezi hlavní trendy i aplikace tzv. bionických prvků a mikroprutových soustav. Jedná se o topologické metody optimalizace konstrukce (obr. 1) za účelem dosažení co možno největších materiálových úspor při zachování dostatečných mechanických a pevnostních charakteristik, které jsou požadované k jeho funkci. Cílem této práce je přiblížit tuto problematiku a aplikovat ji v praxi na součást, která má sloužit především jako reklamní předmět.



Obr. 1 Příklady ukázky aplikace mikroprutové struktury a bionických prvků v praxi <sup>[13][15] [31]</sup>

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

---

## 1.1 Historie 3D tisku

Jak již bylo v úvodu naznačeno, technologie 3D tisku se řadí mezi relativně mladé technologie. Na konci 80. let se tato výrobní metoda objevila pod označením Rapid Prototyping (RP), neboť bylo původně vycházeno z konceptu rychlého a nákladově efektivního vytváření prototypů průmyslových produktů. První patentová přihláška pro RP byla podána již v roce 1980 japonským vynálezcem Dr. Kodanem, avšak nebyla podána s úplnou patentovou specifikací a nemohla být tak uznána.<sup>[3]</sup>

Skutečný vznik 3D tisku lze tak datovat od roku 1983, kdy Charles Hull ve svých 30 letech představil veřejnosti stereolitografický přístroj (SLA) a později v roce 1986 si ho nechal úspěšně patentovat. Charles Hull se také mimo jiné v pozdějších letech proslavil založením společnosti 3D Systems Corporation. Jedná se o jednu z největších a dosud působících organizací v daném odvětví. První modely těchto přístrojů se tak staly jakýmsi pomyslným základním kamenem pro vývoj 3D tisku.<sup>[3] [4]</sup>



Obr. 2 První komerčně vyráběná  
3D tiskárna SLA-250 <sup>[3]</sup>



Obr. 3 Považovaný zakladatel 3D tisku  
Charles Hull <sup>[4]</sup>

V pozdějších letech se začínají objevovat i další metody 3D tisku, například částicová výroba BPM (Ballistic Particle Manufacturing), LOM (Laminated Object Manufacturing) původně patentovaná Michaelem Feyginem, Solid Grounding Curing (SGC), 1989 Selective Laser Sintering. Devadesátá léta se tak stala svědkem rostoucího počtu konkurenčních

společností na trhu v oblasti Rapid Prototyping. Mnoho společností zaniklo, ale některé zůstaly dodnes, jako například společnost 3D systems EOS nebo Stratasys.<sup>[3]</sup>



Obr. 4 Loga společností EOS, 3D systems, Stratasys <sup>[31]</sup>

Dále v průběhu devadesátých let dochází k dalšímu intenzivnímu vývoji AV. Nachází své uplatnění v širokém spektru odvětví. Různorodost požadavků, které byly kladeny na tuto technologii tak ještě více podnítila vývoj nových procesů a technologických postupů pro 3D tisk. Níže jsou uvedeny některé z mnoha další historických milníků, které doprovázely další rozvoj 3D tisku. <sup>[3]</sup>

#### 1992

- Vznik metody Fused Deposition Modeling (FDM).
- Použití 3D tisku při výrobě a testování prototypů součástek v automobilovém a leteckém průmyslu. <sup>[3]</sup>

#### 1999

- Vytvoření části orgánu, který je kombinován s vlastními buňkami pacienta. Jedná se o převrat v medicínském průmyslu a otevírá nové možnosti v oblasti transplantace. <sup>[3]</sup>

#### 2002

- Vytištění první miniaturní funkční ledviny, která byla úspěšně použita při transplantaci pro nemocné zvíře. <sup>[3]</sup>

#### 2005

- Revoluce v 3D tisku. Dr. Adrian Bowyer na Univerzitě v Bath zakládá RepRap, přichází s konceptem se samo replikace 3D tiskáren. Důvod návrhu replikace součástek je jednoduchý, dochází ke snížení nákladů na výrobu a zároveň je tak navyšována dostupnost pro normální uživatele. <sup>[3]</sup>

#### 2008

- Vychází první verze konceptu z projektu RepRap, jedná se o samoreplikační tiskárnu Darwin, která je schopna vytisknout většinu svých komponentů. <sup>[3]</sup>

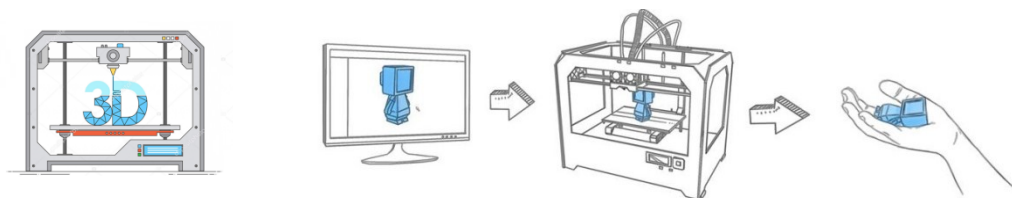
#### 2008

- Společnost Stratasys prezentuje první protoyp karoserie automobilu, který byl vytisknut v živostní velikosti. <sup>[3]</sup>



## 1.2 Technologie 3D tisku

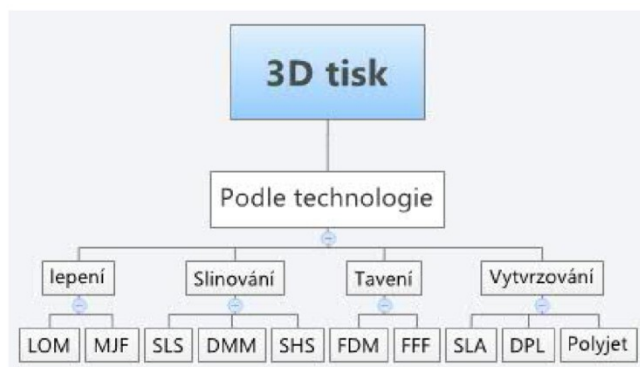
Základní myšlenkou aditivní výroby je zhotovení 3D fyzických modelů z digitálních dat. Digitální data jsou nejčastěji 3D modely, které mohou být vytvořeny například pomocí 3D grafických softwarů nebo využitím dalšího sofistikovaného zařízení, například 3D skenerů.<sup>[4]</sup>



Obr. 5 Zjednodušený princip 3D tisku<sup>[9] [31]</sup>

Všechna zařízení pro výrobu 3D modelů pracují na stejném principu. V zásadě jde o rozložení daného virtuálního modelu do tenkých vrstev a jejich opětovné sestavení do reálného modelu v pracovním prostoru tiskárny. Na rozdíl od klasického obrábění materiál není ubírán, ale naopak je po vrstvách přidáván.

Aditivní výroba nabízí nepřeberné množství materiálů. Mohou to být například plastové prášky, granuláty, extrudovaný plastový drát, kovové prášky, kovový drát nebo polymerní pryskyřice. Dále se lze setkat s aplikací plastových folií, kancelářského papíru ale také hlinou, betonem nebo sádkou.<sup>[6]</sup>



Obr. 6 Základní rozdělení 3D tisku<sup>[6]</sup>

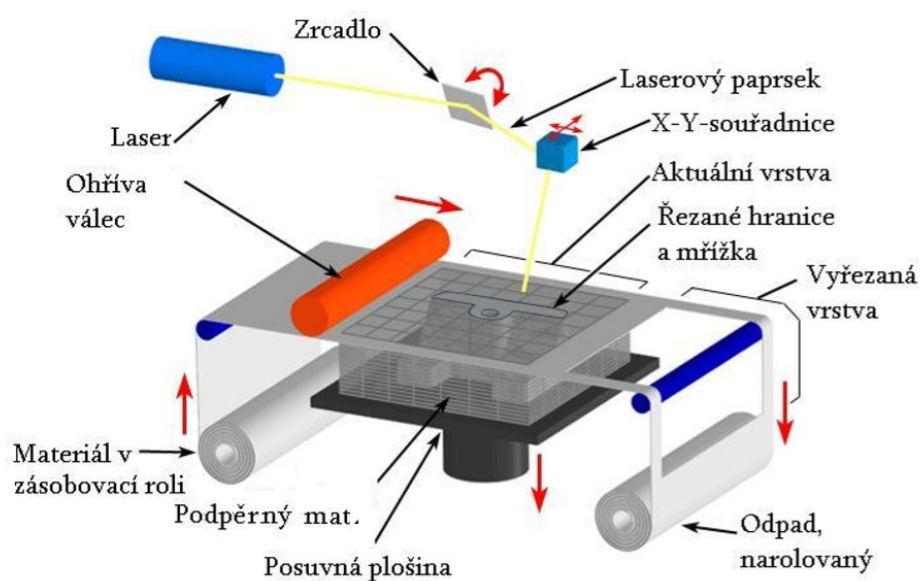
Pevností charakteristiky vytištěného modelu se svými hodnotami přibližují k reálnému výrobku. V některých případech až na 95%, vše se samozřejmě odvíjí od použitého materiálu a zvolené technologie 3D tisku. Základní rozdělení technologií 3D tisku je uvedeno na obr. 6.



Obr. 7 Základní rozdělení 3D tiskáren dle využití<sup>[9]</sup>

## 1.2.1 LOM

Principem metody LOM (Metoda Laminated Object Manufacture), je postupné nanášení jednotlivých vrstev materiálu, které jsou cíleně ořezávány a vrstveny tak, aby vznikl výsledný 3D model (obr. 8). Součást je utvářena na základní desce, která se po každém kroku (ořezu) posune dolů o úroveň tloušťky další nanesené vrstvy materiálu. Stavební materiál je do stroje přiváděn postupným odmotáváním folií ze zásobovací role. Ořez bývá proveden nejčastěji dvěma způsoby, a to nožem nebo CO2 laserem. [9] [10]



Obr. 8 Princip technologie tisku LOM [10]

Jednotlivé vrstvy jsou pak spojeny (spečeny) pomocí soustavy přítlačných válců, které jsou nahřáté na potřebnou pracovní teplotu (ve většině případů bývá jedné straně fólie aplikován přílnavý nátěr). Přebytečný materiál slouží jako podpora (obr. 9). Během procesu je stavební materiál rozdělen na menší dílce (čtverce), aby vyjmutí součásti šlo provést snadněji. Praktický příklad lze vidět na obr. 9. Jedná se o model, který byl vytvořen z papíru. [9] [8]



Obr. 9 Praktický příklad využití technologie LOM, papírový model [6]

Jako stavební materiál není používán pouze jen papír nebo plast, mohou to být i například různé kompozitní materiály, keramiky a jiné. Očištění modelu nemusí probíhat jen mechanicky (ručně), ale i například tryskáním (vodou). Mechanické vlastnosti vytvořeného výrobku se dají přirovnat ke struktuře modelů vyrobených ze dřeva. Jako finální úprava se používá silikonový, uretanový nebo epoxidový nástřik (odolnost modelu vůči pohlcování vlhkosti). [9] [6]

### Výhody:

- tvarová stálost modelu
- možnost obrábění modelu
- tloušťky jednotlivých vrstev jsou definovány fólií
- aplikace u modelů větších rozměrů

### Nevýhody:

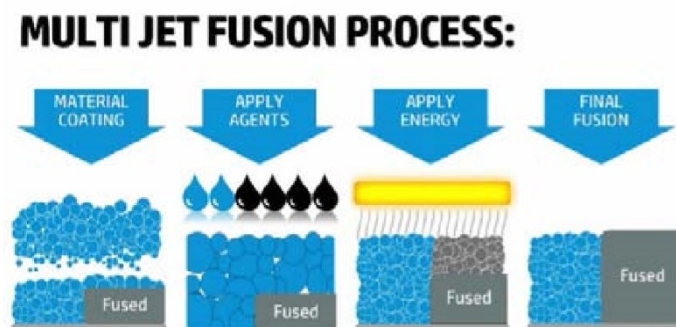
- vyšší pořizovací cena (u laseru)
- proces doprovázen nežádoucími výpary (u laseru)
- odstraňování podpor je zdlouhavý proces (mechanicky)
- nevhodné pro tenkostěnné modely
- velké množství odpadu



Obr. 10 Stroje podporující technologii tisku LOM, výrobce MCO technologie Solido [9]

## 1.2.2 MJF

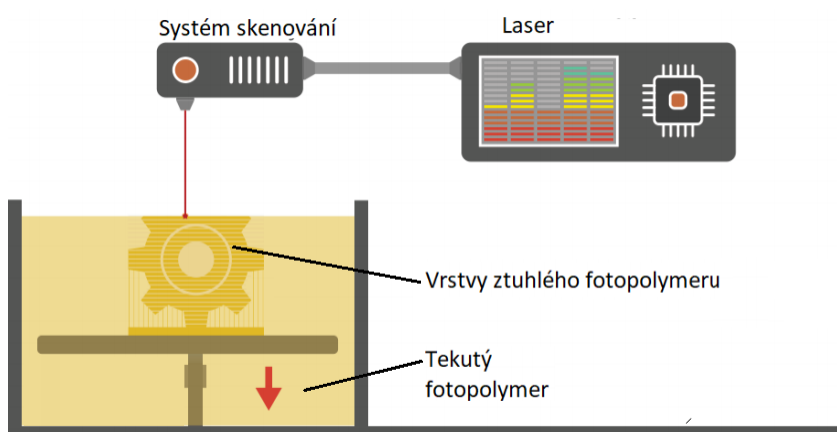
Jedná se o novou technologii vzniklou ve společnosti hP. Principem této metody je postupné nalepování zrněk plastového prášku (Obr. 11). Lepidlo je nanášeno pomocí tiskových hlav a poté vytvrzeno. Celý proces pracuje s vysokou přesností. Hlavní výhodou této technologie je, že umožňuje plnobarevný tisk (Obr. 11) a dále lze například modifikovat pevnost a charakter tisku. Nevýhodou může být odlišná struktura a mechanické vlastnosti, cena prášků a spotřebních materiálů.



Obr. 11 Princip metody MJF, praktický příklad [6]

## 1.2.4 SLA, DLP

Stereo Lithography (SL), základem této metody je fotopolymer je to tekuté plastická hmota, která je citlivá na světlo (při kontaktu dochází ke slinování, vytvrzení). Model je tedy postupným působením UV-laseru vytvrzován a po vytvrzení první vrstvy se stůl posouvá o vrstvu níže směrem hlouběji do kádě (Obr. 12). Během procesu je důležité hlídat stav fotopolymeru tak, aby hladina byla klidná (ustálená) a nevznikala při procesu suchá místa na obrobku. To se děje pomocí speciální lišty, která po každém kroku přejede hladinu a rovnoměrně rozptýlí kapalinu. <sup>[9] [6] [2]</sup>



Obr. 12 Princip metody SLA (ponorný stůl) <sup>[11]</sup>

Zajímavostí u této metody je, že nejvyšší přesností tisku je dosahováno ve středu pracovní plochy. Směrem k okrajům dochází k mírnému snížení kvality tisku, z důvodu náklonu paprsku. Ve středu je jeho tvar (průřez) kulatý, na okraji pracovní plochy mírně oválný. <sup>[9] [6]</sup>



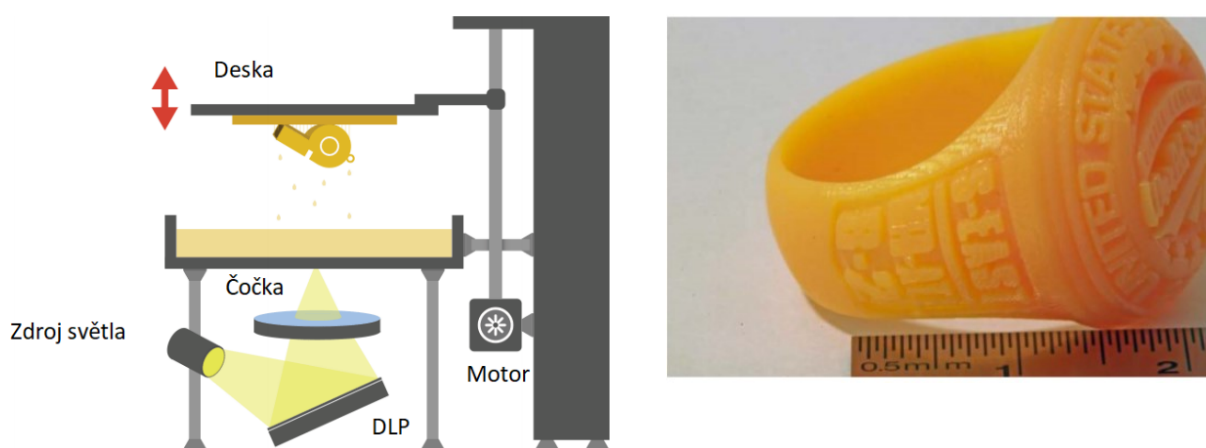
Obr. 13 Ukázka modelů vytvořených pomocí technologie 3D tisku SLA <sup>[9]</sup>



Obr. 14 Stroje společnosti 3D Systems <sup>[9]</sup>

Na obr. 13 lze vidět typické výrobky vytvořené tiskovou metodou SLA. Mezi největší výrobce těchto strojů patří společnost 3D Systems (Obr. 14).<sup>[9] [6]</sup>

V praxi se však můžeme setkat i s jinou koncepcí této metody (Obr. 15). Fotopolymerová kapalina je vytvrzována pomocí speciálního DLP projektoru zespodu. Výhodou této koncepce je, že při procesu nevznikají suchá místa. Nevýhodou této metody je možnost připékání fotopolymeru v oblasti průchodu světla do kádě (skrže sklo). Z toho plyne nutnost aplikovat speciální fólii na dané místo, které je světlu vystavěno.<sup>[9]</sup>



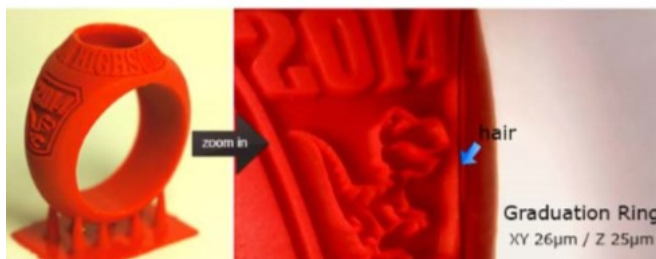
Obr. 15 Princip metody DLP (využití DLP projektoru)<sup>[31]</sup>

#### Výhody:

- možnost tisku objemnějších modelů
- možnost tisku tenkostěnných modelů
- lze vytvářet malé detaily
- lze vytvářet malé otvory s velkou přesností
- výroba forem pro lití nebo vstřikování
- rychlost tisku

#### Nevýhody:

- vyšší náklady (výkonný laserový zdroj)
- nutno zařadit do procesu dokončovací operaci (UV komora, vytvrzování)
- nižší odolnost modelu vůči tepelnému působení
- polymer má toxické vlastnosti

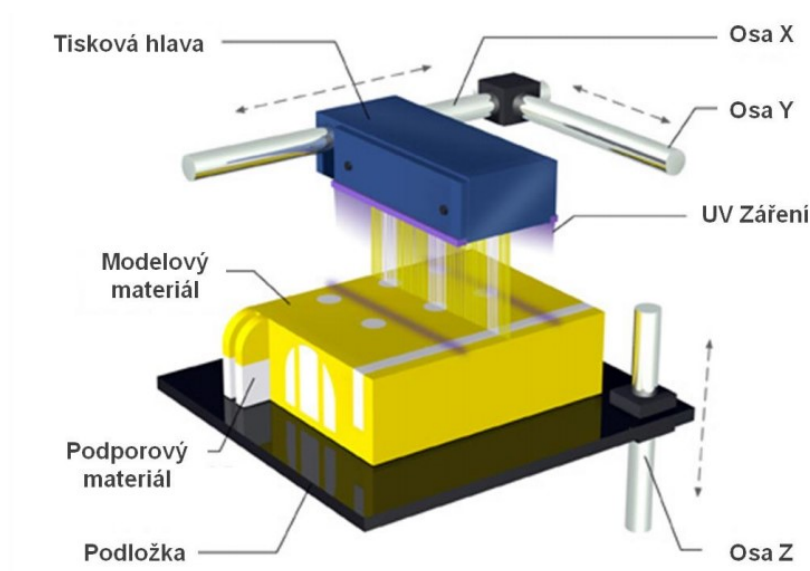


Obr. 16 Modely vytištěné pomocí metody DLP (modely mají vysokou přesnost)<sup>[9]</sup>



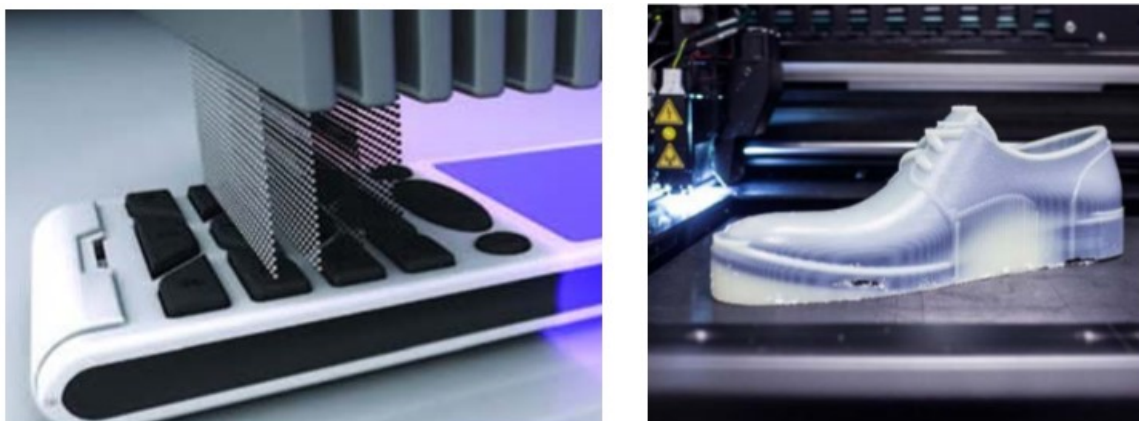
## 1.2.4 PolyJet

Tato technologie je patentována společností OBJet Geometries. Princip metody spočívá v postupném nanášení tekutého fotopolymerového materiálu (pomocí trysek), který je posléze vytvrzován pomocí pohyblivé UV lampy (obr. 17). Výhodou této metody oproti SLA je ta, že výsledný produkt (model) už není nutné dodatečně vytvrzovat v UV komorách. Nanesený materiál během procesu okamžitě tuhne, poté je vytvrzen UV lampou.



Obr. 17 Princip metody 3D tisku PolyJet <sup>[10]</sup>

Pro stavbu složitějších modelů je potřeba použít podpůrnou složku. Jedná se o materiál, který je vytvořen na bázi gelu a aplikuje se stejným způsobem jako základní materiál (pomocí trysek). Po ukončení tisku jsou podpůrné složky odstraněny, rozpuštěny vodou. Díky tomu lze například vytvářet uzavřené sestavy, které po odstranění podpůrného materiálu jsou plně pohyblivé. Další výhodou podpůrného materiálu je ta, že ho lze aplikovat opakovaně. <sup>[8] [9] [11]</sup>



Obr. 18 Příklad tisku pomocí technologie PolyJet <sup>[6]</sup>

Technologie má svou specifickou vlastnost, a to že během tisku lze kombinovat více materiálů (Obr. 18), protože hlavice může obsahovat několik různých trysek. Technologie je tak ve své podstatě velmi podobná klasickému tisku jak ho známe. Vybírat lze z velkého množství materiálů s odlišnými vlastnostmi. Základní materiál může být například transparentní, neprůhledný, lesklý, matný atd. Jako stavební materiál lze použít speciální fotopolymer s odlišnými vlastnostmi (Vero, Tango, ABS-like, RGD525), gumu a jiné. [6] [9] [10]

#### Výhody:

- nanášení tenkých vrstev
- kvalita povrchu tištěného modelu
- tenkostěnné modely
- rozmanitost použitelných materiálů
- rychlost tisku

#### Nevýhody:

- nutnost tisknout plné podpory
- nižší mechanické vlastnosti
- použití spíše pro desingový náhled na výrobek



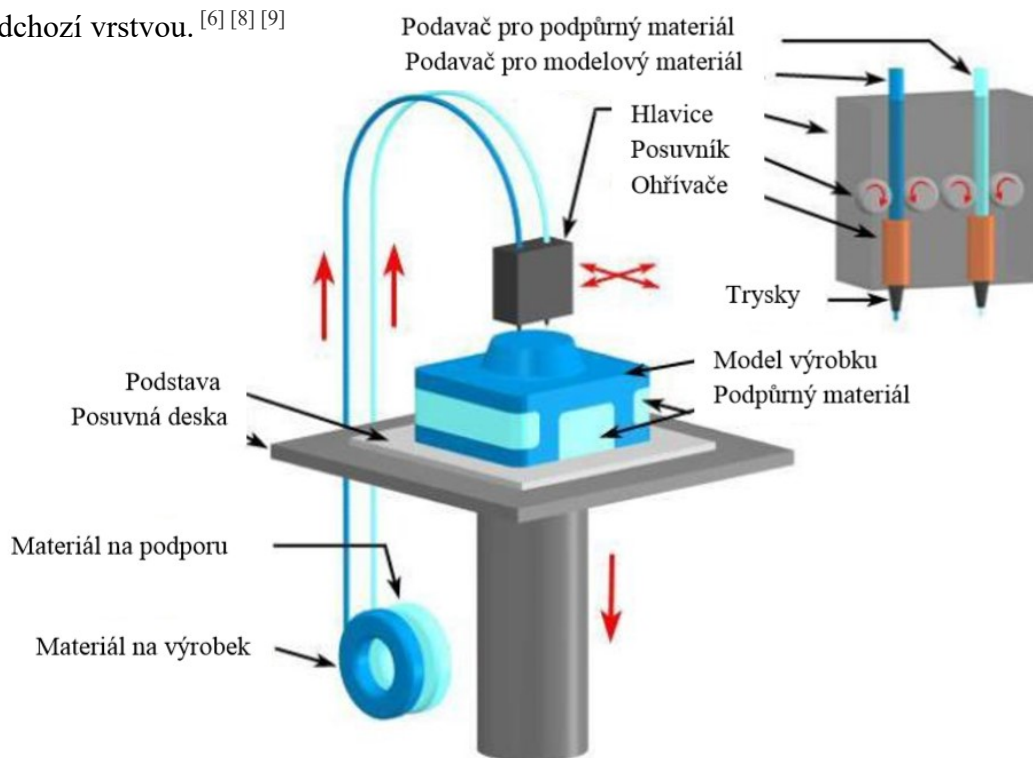
Obr. 19 Modely vytištěné technologií PolyJet [9]



Obr. 20 Stroje podporující technologie PolyJet, výrobce Objet Geometries [9]

### 1.2.5 FDM, APF

Nejjednodušší a nejpoužívanější technologií 3D tisku je metoda FDM (Fused Deposition Modeling). Princip je jednoduchý. Materiál ve formě plastového drátu je podáván do hlavičky, kde dochází k jeho roztavení. Tavený plast se nanáší posupně v jednotlivých vrstvách na pracovní desku. Po nanesení vrstvy dochází ke ztuhnutí a spojení materiálu s předchozí vrstvou. [6] [8] [9]



Obr. 21 Princip metody 3D tisku FDM [10]

U složitějších dílců je nutné aplikovat podpůrný materiál, který je dávkován dle potřeby druhou tryskou (Obr. 21). Podpůrný materiál po dokončení tisku lze odstranit mechanicky. Některé druhy mohou být rozpouštěny v chemickém roztoku. Tím dochází k ulehčení celého procesu, zvláště v místech se špatným přístupem. [6] [8]



Obr. 22 Praktická ukázka metody tisku FDM [31]



Nanesený materiál téměř okamžitě tuhne, přesnost výsledného modelu je závislá na průměru trysky. Obvykle bývá v rozmezí 0,1 až 0,3 mm. Mezi nejčastěji používané materiály patří termoplasty nebo různé vosky. [8]

#### Výhody:

- velký výběr materiálů (ABS, PC, PPS, PLA)
- nevznikají žádné škodlivé emise při procesu
- minimum odpadu
- jednoduchost technologie
- cenově dostupná

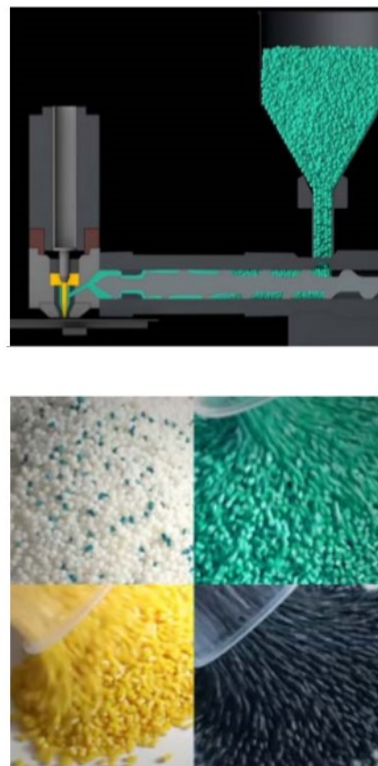
#### Nevýhody:

- hrubší povrch materiálu
- omezení přesnosti
- odstraňování podpůrného materiálu



Obr. 23 Cenově dostupný model tiskárny Prusa i3, od známého českého výrobce Josefa Průši [31]

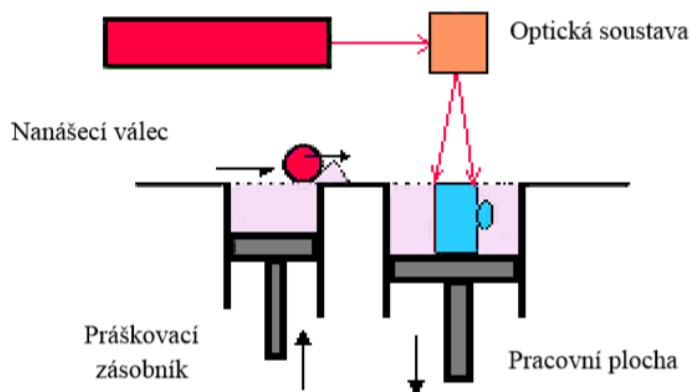
Obdobou technologie FDM je metoda APF (Arburg plastic freeforming). Rozdíl mezi nimi je ten, že APF využívá jako vstupní materiál granulovaný plast. K tavení materiálu dochází ve třech tepelných zónách, materiál během tohoto procesu je postupně podáván šnekovým zařízením (Obr. 24). Na výstupu je tavenina stlačována pod velkým tlakem a vystřikována v podobě malých kapek. Díky vysokému tlaku dochází k lepšímu spojení tištěného materiálu, což zajišťuje jeho větší pevnost. Vlákná v modelu nejsou uspořádány kontinuálně. To zaručuje lepší vlastnosti modelu při chladnutí (smršťování). Dalšími výhodami této technologie jsou pořizovací ceny materiálu a vysoká pevnost (až 90% pevnosti vstříkovaného dílce). Naopak nevýhodou může být náročnější výměna materiálu, jakost povrchu, rychlost tisku. [6]



Obr. 24 Princip metody tisku APF, ukázka stavebního materiálu pro tisk [6]

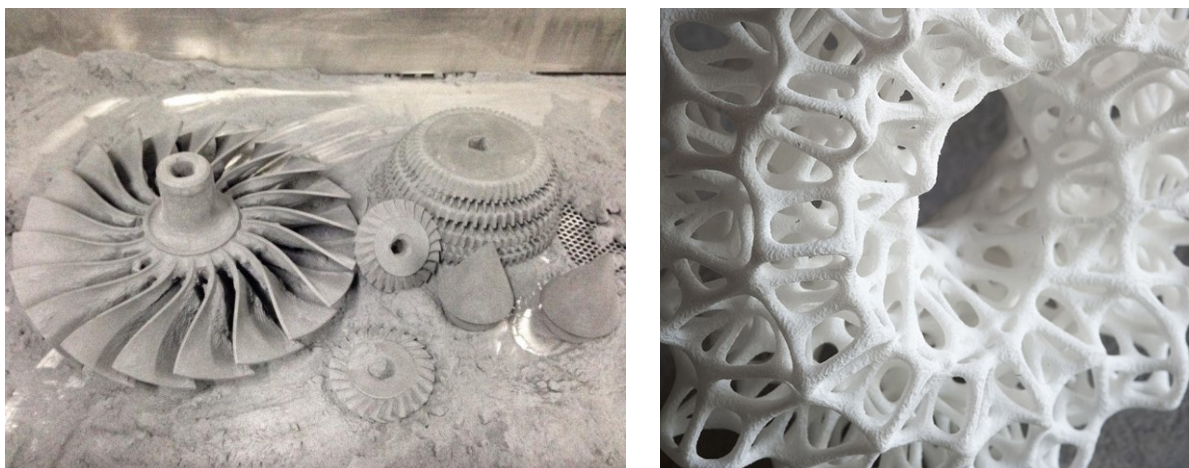
## 1.2.6 SLS, SLM

U technologie SLS (Metoda Selective Laser Sintering) je způsob tisku je podobný Stereolitografii (SL). Základním principem této metody je spékání práškového materiálů pomocí tepelného zdroje. K tomu jsou nejčastěji používány výkonné CO<sub>2</sub> lasery. Nespornou výhodou této technologie oproti SLA je, že modely vytvořené touto metodou dosahují daleko lepších mechanických vlastností. [8] [9]



Obr. 25 Princip metody 3D tisku SLS [10]

Princip metody je znázorněn na obr. 25. Základem je pohyblivý stůl (pracovní plocha), na kterou se pomocí nanášecího válce nanese první vrstva práškového materiálu. Ta je pomocí tepelného zdroje spékána do požadovaného tvaru. Po spečení první vrstvy se pracovní plocha posouvá o úroveň níže a celý proces se zopakuje. Jednotlivé vrstvy jsou tedy k sobě postupně spojovány, dokud nedojde k vytvoření samotného modelu. Okolní materiál, který během samotného procesu není spečen, slouží jako podpůrný materiál (nosná konstrukce). Díky tomu lze tak efektivně vytvářet konstrukce se složitějším vnitřním uspořádáním (Obr. 26). Neslinutý (nespečený) materiál může být použit znovu. [6] [9]



Obr. 26 Výrobky vytvořené metodou SLS [9]

Jako základní materiál lze použít různé druhy prášků. Může to být například plast (PI, PC), nylon, keramika nebo kompozity. Je možné vytvářet i modely z kovových prášků (Obr. 26 vlevo). Výrobní technologie je velice podobná a často se lze setkat s označením SLM. Výběr materiálů je opravdu pestrý, mohou to být například různé druhy nerezavějících ocelí, slitiny hliníku, titanu a jiné. Celý proces spékání v obou případech probíhá nejčastěji v komorách s inertním plynem, předchází se tak možnosti vznícení (výbuchu). [6] [9] [10]

Výsledná hrubost (jakost) vytištěného modelu je závislá na tloušťce jednotlivých vytvářených vrstev. V praxi se lze setkat se stroji, které mohou vytvářet tenké vrstvy od 0,02 mm až do řádů několika desetin milimetru. Obecně se dá říct, že modely vytvořené touto metodou mají větší drsnost povrchu. Proto bývá většinou nutností zapojit do samotného výrobního procesu i finální úpravy, jako jsou například tryskání, obrábění, broušení, leštění atd. V případě kovových dílců to mohou být omílací zařízení s broky. [8]

#### **Výhody:**

- technologie nevyžaduje podpurný materiál
- neslinutý materiál lze opakovaně použít
- vysoká pevnost dílců
- široká škála použitelných materiálů
- relativně vysoká přesnost tisku

#### **Nevýhody:**

- cena tiskového materiálu
- prášek je toxický (pro vdechnutí)
- možnost výbuchu práškového materiálu
- modely lze vytvářet pouze plné
- případně je nutné navrhnout konstrukci tak, aby bylo možné prášek z modelu vysypat



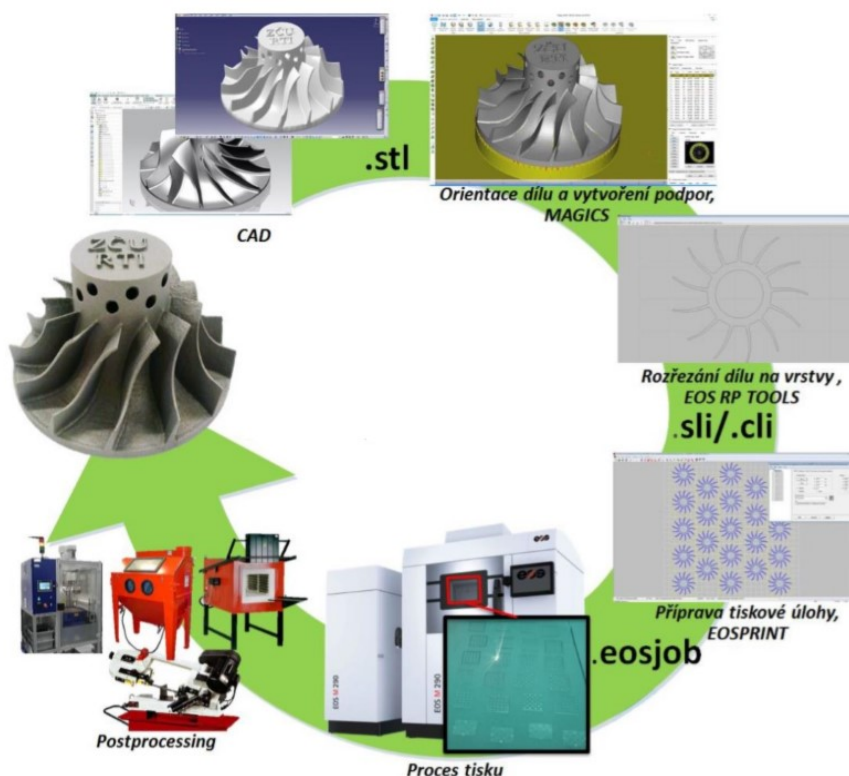
Obr. 27 Tiskárna společnosti EOS P770, určená pro tisk plastů [28]

Modely vytvořené metodou SLS najdou své využití v různých odvětvích průmyslu, pro své dobré mechanické vlastnosti a celková přesnost tisku. Mezi největší výrobce strojů podporujících technologii tisku SLS patří EOS (Electro optical Systems). [9]

### 1.3 Výrobní proces aditivních technologií

Ačkoliv se na první pohled může jevit, že výrobní proces aditivních technologií je jednoduchou záležitostí oproti konvenčním technologiím, tak i zde je nezbytně důležité správně pracovat se vstupními daty a následně je pak úspěšně aplikovat v praxi. Odměnou je pak funkční výrobek s co možná největší materiálovou úsporností a neoptimálnějšími mechanickými vlastnostmi. [10]

Celkový výrobní proces bývá nejčastěji složen z několika základních kroků (operací). Každý z těchto kroků má zásadní vliv na výslednou kvalitu odvedené práce, proto je nutné práci v závislosti na výrobních požadavcích účelně rozčlenit (stanovit) tak, abychom předešli případným kolizím. Na obr. 28 je schematicky rozčleněn příklad takového výrobního procesu v jednotlivých krocích. [5] [8]



Obr. 28 Schéma výrobního procesu aditivních technologií [5]

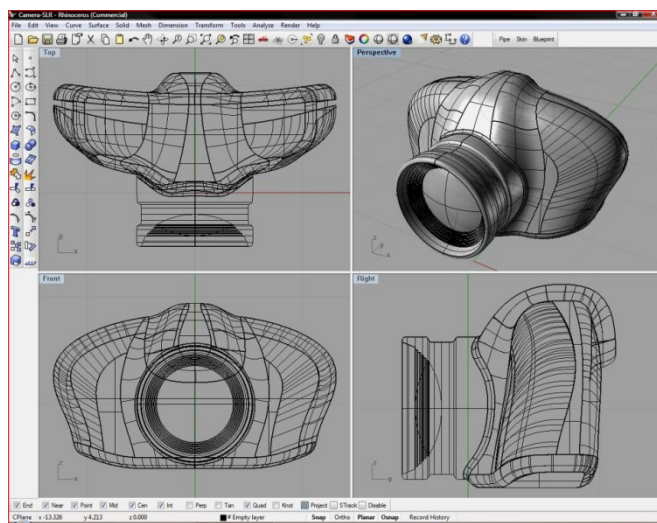
Často také bývá pracovní postup souhrnně rozdělen do jakýchsi tří pomyslných etap. První z nich je tzv. Preprocessing. Jde o složku zahrnující především přípravu vstupních dat, která jsou pak následně přenesena do výrobního stroje. Dále je tu tzv. Processing, který zahrnuje samotnou výrobu modelu a nakonec Postprocessing, v něm jsou řešeny úkony, které jsou prováděny po dokončení samotného 3D tisku. [5]



### 1.3.1 Preprocessing

Samotná příprava vstupních dat pro tis často bývá jednou z nejvíce časově náročných prací ve vlastním výrobním procesu. Zahrnuje celkem širokou škálu úkonů, které nám zásadně ovlivní konečný produkt. [5]

Prvním krokem v procesu je vytvoření vlastního 3D CAD modelu. Jedná se o model, který bývá nejčastěji objemového charakteru, případně může být ohraničen jen plochami. Základním pracovním nástrojem pro tvorbu takových dat bývají tzv. CAD softwary. Zkratka CAD vznikla ze spojení anglických slov Computer Aided Desing, česky volně přeloženo jako počítačová podpora konstruování. Jak už z názvu vyplývá, jedná se o programy, které nám mají být účelným pomocníkem právě pro řešení problémů spojených s konstruováním. Nejsou to tedy jen výhradně programy, sloužící pouze k avizovanému 3D modelování, ale najdou své využití například i při návrhu konstrukce (její funkčnosti například), lze provádět pevnostní analýzy, modelovat různé kolizní situace, konvertovat data, optimalizace konstrukce a mnohé další. 3D modely jde však vytvořit i jinou cestou, například za použití různých druhů speciálního sofistikovaného zařízení. Tím mohou být například různé speciální 3D skenery, stroje využívající hmatové modelování (robotické rameno s hmatovým čidlem) nebo fotogrammetrické softwary pracující s digitálním fotoaparátem. Příklad takového 3D skeneru je zobrazen na obr. 30. Jedná se o lehce přenosný skener společnosti Geomatic, pracující s modrým LED světlem. Je schopen převést fyzická data do digitálních podoby až s přesností na 0,06 mm. [5] [10]

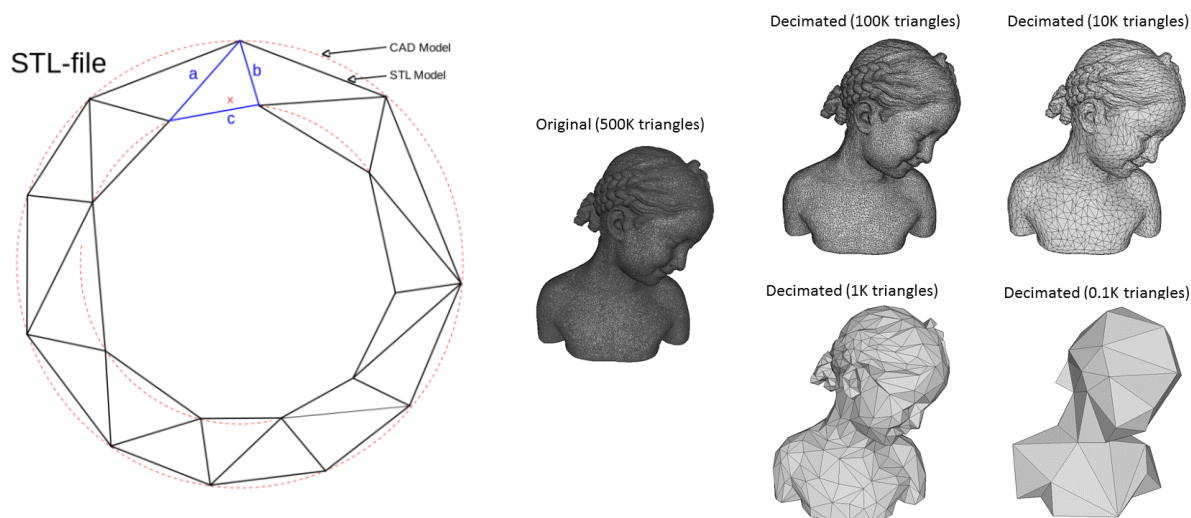


Obr. 29 Ukázka pracovní prostředí programu Rhino 5.0 pro tvorbu 3D modelů [31]



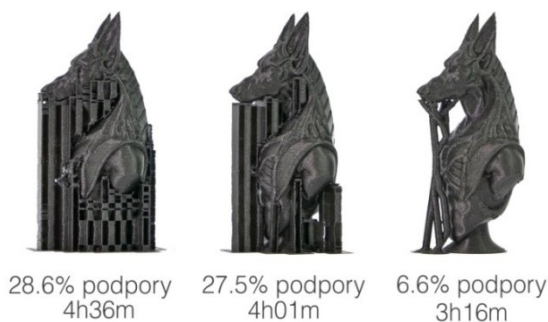
Obr. 30 Přenosný 3D skener společnosti Geomatic [31]

Po vytvoření CAD souboru je nutné tyto data následně převést do formátu STL, neboť formát STL (Standard Triangulation Language) je výchozím zdrojovým formátem pro vlastní 3D tisk. Možnost vygenerovat tento soubor má v dnešní době valná většina používaných CAD systémů. Výsledkem převodu formátu je vznik nové síťované plochy, která kopíruje (aproximuje) původní plochy vytvořeného modelu. Síť je složena z malých trojúhelníkových segmentů, z nichž každý s sebou nese údaje o souřadnicích vrcholových bodů a údaj o směru orientace normálového vektoru. V závislosti na hustotě vytvořené sítě se samozřejmě přibližujeme nebo oddalujeme podobě původního modelu (Obr. 31 vpravo) [5] [10] [14]



Obr. 31 Převod CAD souboru do STL [14] [31]

Úspěšně převedený soubor ve formátu STL následně nahrajeme do stroje pro samotný 3D tisk, například pomocí přenosného datového zařízení. K tiskovým strojům jsou dodávány specializované softwary, ve kterých je dále nutné nastavit další potřebné parametry pro tisk. V první řadě jde o rozmístění tištěných modelů na pracovní ploše, poté nás zajímá jejich orientace. Je nutné brát i ohled na stavbu podpór (orientujeme součást tak, aby bylo použito co možno nejméně podpůrného materiálu). Dále lze nastavit i měřítko (velikost) tištěného objektu a v neposlední řadě parametry ovlivňující samotnou kvalitu tisku. Mezi ně patří rychlost tisku, volba materiálů nebo například nastavení tloušťky jednotlivých vrstev tisku. Vše se odvíjí od technologie tisku, kterou jsme si vybrali.



Obr. 32 Vliv rychlosti tisku na výstavbu podpór, technologie FDM [31]

### 1.3.2 Processing

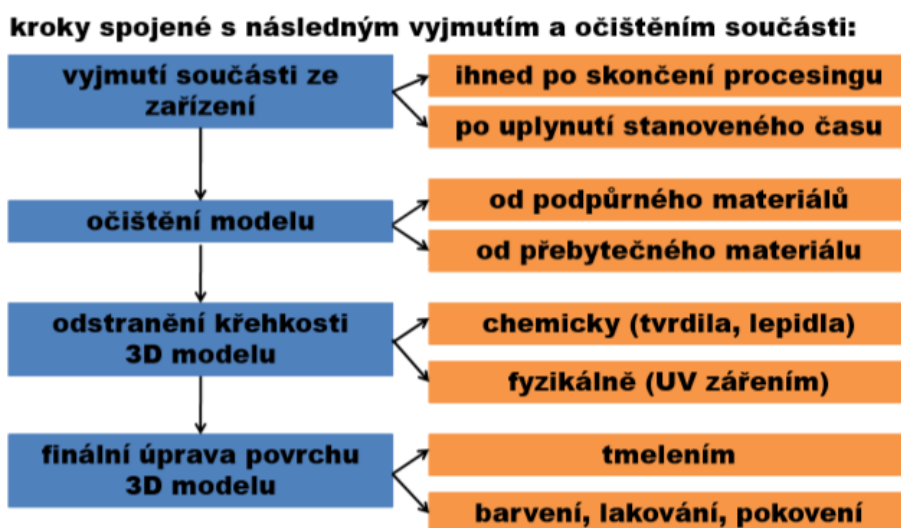
Tato etapa již zahrnuje samotnou výrobu 3D modelu. Výrobek je vytvářen postupným vrstvením přídavného materiálu v závislosti na použité technologii. Při výběru je nutné dbát na určité aspekty, které s sebou jednotlivé technologie přinášejí (Obr. 33). <sup>[5] [9]</sup>



Obr. 32 Souhrn parametrů, které jsou závislé na výběru 3D technologie 3D tisku <sup>[9]</sup>

### 1.3.3 Postprocessing

Jedná se o konečnou část výroby. Po vyjmutí modelu z pracovního pole tiskárny je model očištěn a zbaven podpůrného materiálu. Metody očištění se mohou lišit v závislosti na použité technologii 3D tisku. Po očištění může být model podroben řadě dalších dokončovacích operací, jejichž cílem je zlepšení mechanických a vizuálních (estetických) vlastností. Základní přehled dokončovacích operací je zobrazen na obr. 33. <sup>[5] [9]</sup>



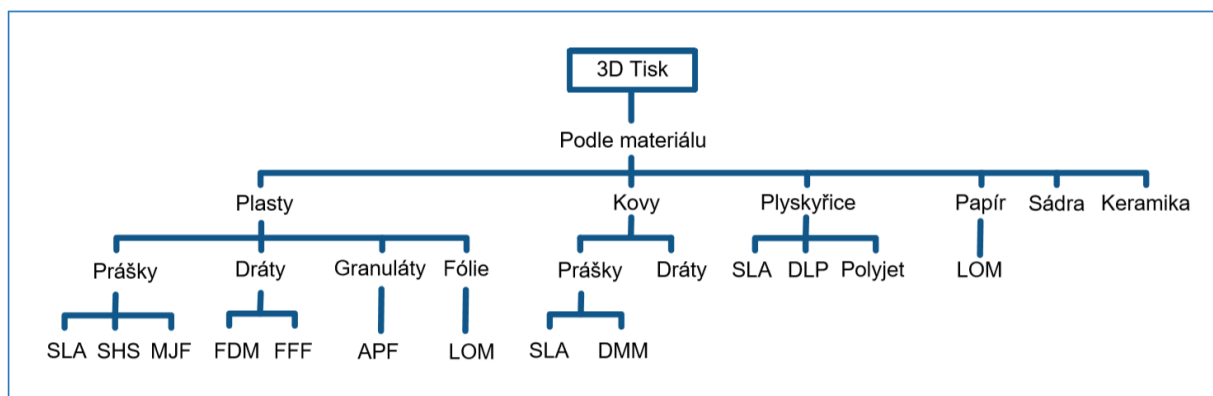
Obr. 33 Základní schéma dokončovacích operací u AT <sup>[9]</sup>

## 1.4 Materiály

Nespornou výhodou aditivních technologií je jejich rozsáhlý sortiment stavebních materiálů, které nám mohou nabídnout. Abychom dosáhli co možná nejlepších pracovních výsledků, je důležité se v tomto sortimentu dobře orientovat, neboť každý materiál má odlišné vlastnosti a je vhodný pro jiné účely. Na obr. 35 je zobrazeno základní rozdělení materiálů, které bere v úvahu jejich druh (plast, kov, pryskyřice, papír, atd.), formu (prášky, struny, fólie, atd.) a technologie 3D tisku, která s těmito materiály přichází následně do styku. [6] [7] [13]

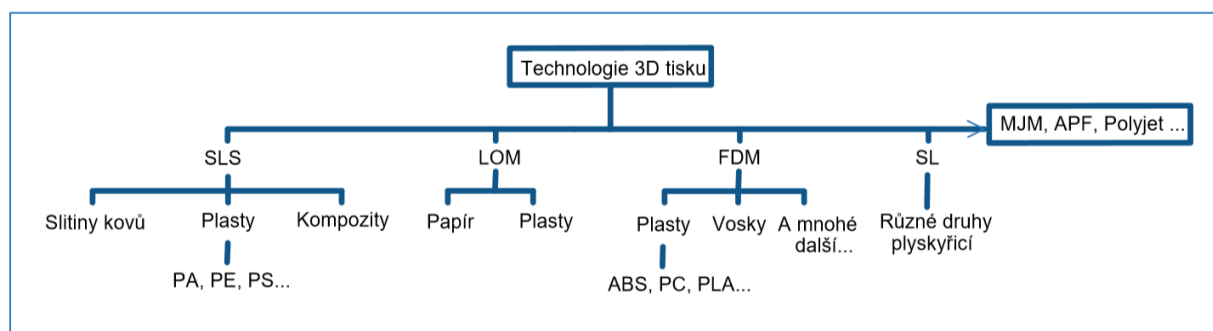


Obr. 34 Přídavný materiál ABS, Provedené ve formě granulátu a struny



Obr. 35 Graf zobrazující, materiály a technologie, které s těmito materiály pracují [6]

Na obr. 36 jsou pro ukázkou zobrazeny jednotlivé technologie 3D tisku a k nim přiřazeny různé druhy materiálů, se kterými mohou pracovat. Pro některé druhy 3D tisku jsou stavební materiály velice specifické, naopak u některých metod lze používat stejné druhy materiálů, ale mohou se lišit například ve formě, ve které jsou využívány (granulát, struna, fólie a jiné). [6] [7]

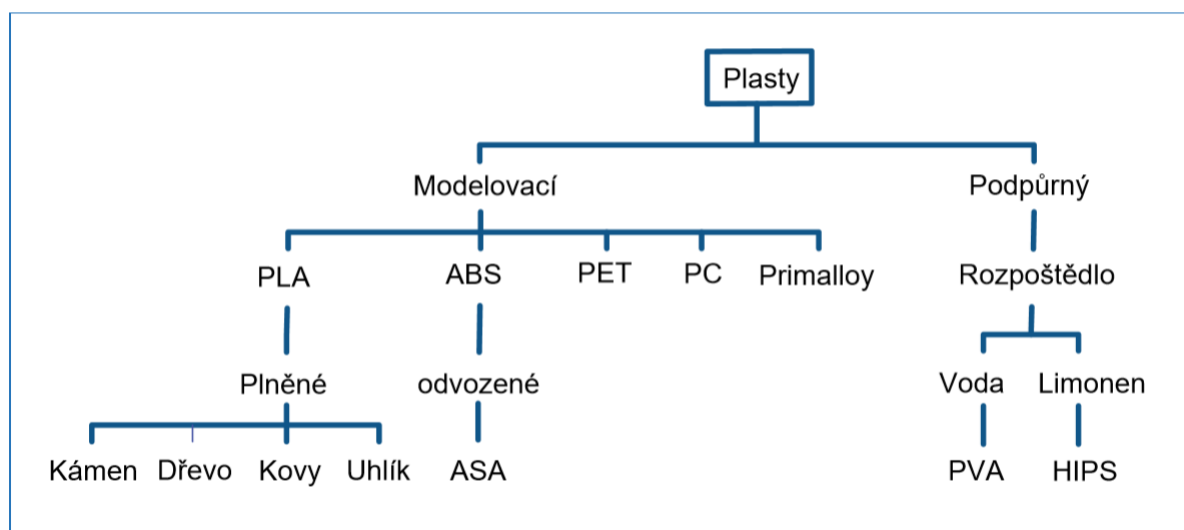


Obr. 36 Graf přiřazující technologie 3D tisku a materiály s nimiž pracují [6]



### 1.4.1 Základní druhy plastových materiálů

V následující kapitole jsou rozepsány plastové materiály. Především ty, které jsou hojně využívány technologií tisku FDM, FFF, či APF. Na obr. 37 můžeme vidět přehled jejich základního rozdělení. Jednotlivé materiály mají své specifické vlastnosti. Za zmínku také stojí materiály sloužící ke stavbě podpurných konstrukcí. V současnosti jsou využívány dva základní typy podpurných materiálů, a to rozpustné ve vodě nebo v Limonenu (jedná se o druh alkoholu pocházejícího z citrusů, využívaného například v kosmetickém průmyslu).<sup>[7]</sup>



Obr. 37 Základní přehled rozdělení plastů využívaných v oblasti AT<sup>[7]</sup>

#### ABS (akrylonitrilbutadienstyren)

Jedná se o jeden z nejoblíbenějších materiálů využívaných pro 3D tisk. Je vhodný pro výrobky, které jsou během provozu vystaveny vyšším teplotám (odolnost 60°C a výše). Struktura materiálu je relativně pevná a díky příměsi syntetického kaučuku je značně odolnější vůči nárazům a jiným poškozením. Materiál lze použít pro účely jak venkovního tak i vnitřního použití. Protože ABS lze rozpouštět pomocí acetonu, můžeme takto jednoduše například jednotlivé modely slepit dohromady nebo na nich zahlazovat ostré hrany, či případně upravit povrch ploch. Značnou nevýhodou materiálu je jeho teplotní roztažnost (objem modelu se při chladnutí zmenšuje), čímž může dojít k deformaci modelu, či k předčasnému odloupení modelu z pracovní plochy.<sup>[7][18]</sup>

## **PLA (polypropylen)**

PLA patří také mezi hojně využívané materiály v oblasti aditivní výroby. Jeho teplota tání je nižší než u materiálu ABS a během procesu nedochází k tak velkým deformacím. Dále vyniká celkovou kvalitou tisku a jeho přesností. Je vhodný mimo jiné například pro tisk menších modelů s drobnými detaily. Nevýhodou stavebního materiálu může být jeho slabší chemická odolnost, mechanické vlastnosti a odolnost vůči tepelnému záření (do 60°C). [7] [13]

## **PC (polykarbonát)**

Jedná se o materiál vyznačující se především vysokou tvrdostí a tepelnou odolností. V současnosti se jedná asi o nejtvrdší materiál, se kterým se kterým mohou tiskárny pracovat (bavíme-li se o materiálech podporujících technologii FDM tisku). Nevýhodou může být delší doba tisku (dlouho tuhne). Celkový proces tisku je náročnější a složitější. [7] [18]

## **PET (polyethylentereftalát)**

Jak už z názvu vyplývá, jedná se o plast, ze kterého jsou vyráběny PET láhve. Někdy se můžeme setkat také i s označením PETG. V tomto případě hovoříme se o víceméně stejný materiál s drobnými odlišnostmi. Materiál je pevný, pružný, dále vyniká odolností proti tepelnému záření a je odolný vůči působení chemických složek (například kyselinám a rozpouštědlům). Materiál lze použít jak ve venkovním tak i ve vnitřním prostředí. Nevýhodou může být vyšší složitost tisku a jeho časová náročnost. [7] [18]

## **NYLON (PA-polyamid 6.6)**

Jedná se o velmi silný materiál se všestranným využitím. Vyznačuje se především svou vysokou flexibilitou (pružností) a vynikající adhezí. Své využití materiál najde především pro tisk mechanických součástí. Nevýhodou tohoto materiálu mohou být jeho slabší tiskové vlastnosti. Při vlastním tisku nemusí dojít k úplnému spojení jednotlivých nanesených vrstev, což může vést k rozpadu modelu. Celkový proces tisku je tedy náročnější. [18]

## **HIPS (high impact polystyrene - houževnatý polystyrén)**

Tento materiál se nejčastěji využívá pro stavbu podpůrných konstrukcí. Jde o stabilní, houževnatý a odolný materiál. Má podobné vlastnosti jako ABS,

lze ho rozpustit pomocí Limonenu. Své využití tedy najde především na dvouhlavých tiskových strojích (se dvěma tryskami). [18]

### TPU, TPE (termoplastické elastomery)

Jedná se o materiály, které můžeme také znát pod názvem termoplastické kaučuky. Stavební materiál se vyznačuje především jeho velkou flexibilitou (pružností). Dále je odolný vůči vnějšímu poškození (škrábnutí), nárazu a mastnotám. Naopak není vhodné jej vystavovat vůči chemickým složkám, jako jsou například různá rozpouštědla či kyseliny. [7]

### PVA (polyvinylalkohol)

Jeden z novějších materiálů, který byl speciálně vyvinut pro stavbu podpurných konstrukcí. Jeho nespornou výhodou je fakt, že je rozpustný v čisté vodě, a to dokonce i ve studené. Pokud teplotu zvýšíme, celý proces se urychlí. Mezi další přednosti tohoto stavebního materiálu patří dobrá zpracovatelnost, kvalita tisku, správné vrstvení materiálu a schopnost vytvářet drobné detaily. Materiál není toxický a je biologicky odbouratelný. Jeho nevýhodou mohou být zvýšené nároky na skladování. Doporučuje se skladovat v uzavřeném obalu, neboť je velice citlivý na vlhkost. [7]

**Laywood, Lybrick, Flex, Elastic a mnohé další** - škála materiálů využitelných pro 3D tisk je opravdu rozsáhlá, uvedené materiály dále rozšiřují možnosti tisku svými specifickými vlastnostmi (např.: napodobení dřeva, kamene, zvýšení pružnosti a jiné). [7]



Obr. 37 Vizuální srovnání různých typů stavebních materiálů,  
které jsou využíván v oblasti 3D tisku [31]

### 1.4.2 Práškové materiály

Práškové materiály jsou využívány nejčastěji u metod SLS, SLM a jim podobné. V praxi se lze setkat s velkou škálou stavebních materiálů. Mohou to být například prášky různých kovových slitin, keramiky nebo plastů. Jejich vlastnosti se výrazně liší, především v závislosti na tepelném záření. Některé se rozpínají, některé smršťují. Ideálně je vyžadováno, aby materiály vykazovaly minimální stažení, či expanze v okamžiku, kdy jsou vystaveny tepelnému zdroji (laseru). Toto bohužel nikdy nemůže nastat, neboť objem prášku před spečením je vyšší než u konečného (spečeného). Rozdíl objemů může činit až 60%. [6] [7]



Obr. 38 Konečná fáze tisku, očištění modelu od přebytečného materiálu (prášku) [31]

Velikost zrna použitého prášku závisí na mnoha faktorech, jde například o požadovanou rychlost výstavby modelu, jeho přesnost (detail modelu), výslednou hustotu modelu a homogenitu struktury. Vyšší zhuštění práškové hmoty zajišťuje vyšší hustotu výsledného dílce. Vyšší hustoty práškového materiálu je dosaženo menšími kruhovými zrny v prášku. Nejčastěji používanou základní složkou jsou polyamidy (PA), které jsou modifikovány dalšími prvky. Pro představu jsou zde vypsány některé základní druhy prášků, s nimiž se lze v praxi setkat. [7] [13]

#### PA 2200 (polyamid)

Jde o pevný materiál, využívá se především pro výrobu funkčních dílců a prototypů. Vyrobené dílce mají vysokou mechanickou a teplotní odolnost. Mezi jejich další výhody patří dlouhodobá stálost a zároveň jsou odolné vůči působení chemických látek. Modely lze případně i naimpregnovat a zajistit tak odolnost vůči vodě. [30] [29]

### **Alumid (hliník plněný polyamidem)**

V tomto případě se jedná o směs hliníkového a polyamidového prášku. Nespornou výhodou tohoto materiálu je jeho snadná obrobiteľnosť, minimálna pórovitosť štruktúry, kovový vzhľad a odolnosť voči vyšším teplotám až do 100°C. V praxi nájde svoje využitie napríklad v automobilovom priemysle, kde slouží pro účel testování prototypů v aerodynamickém tunelu.

[30]



Obr. 39 Praktická ukážka 3D tisku

Alumidem [31]

### **PA-GF (Sklem plněný polyamid)**

Polyamidový prášek plněný skelnými částicami se vyznačuje relativně dobrou tepelnou odolností, která může dosahovat až 110 °C. Materiály jsou tedy obvykle využívány tam, kde lze počítat s vyššími mechanickými a tepelnými zátěžemi. Materiál má dále vysokou tvrdost, pevnost v tahu, hustotu a odolnost. PA-GF je tak ideální díky svým vlastnostem pro použití i v náročnějších podmínkách. [31]

### **TPU 92A-1 (Termoplastový polyuretan podobný gumě)**



Jedná se termoplastový polyuretan, který je velice silný a pružný. TPU 92A-1 je jediným materiálem pro 3D tisk, který nabízí vysokou odolnosť proti pretrženiu a oteru, vysokou odolnosť voči dynamickému zatíženiu. Teplotná odolnosť materiálu sa pohybuje v rozmedzí teplot -20 °C až 80 °C. Tento materiál není nijak závadný pro okolí, lze ho použít i potravinářském průmyslu.

[30]

Obr. 40 Praktická ukážka materiálu

TPU 92A-1 [31]

### **PA 2241 FR (Nehořlavý polyamid)**

PA 2241 FR je nehořlavým materiálem. Díky své specifické vlastnosti nájde svoje uplatnenie napríklad v letectví nebo kosmonautice. [30]

Mezi další hojně využívané práškové materiály neodmyslitelně patří i různé kovy a jejich slitiny. Cena kovových prášků je velice vysoká, náklady jsou například mnohem vyšší než u klasických plastových prášků, které jsou převážně složeny z polyamidu. Kovy se netaví stejně jako polymery (výjimku mohou tvořit kovy nízko tavitelných slitin). Proces spékání je závislý na dvou složkách. První z nich jsou tzv. konstrukční elementy, neboli kovy s vysokým bodem tavení. Druhou složkou jsou pojidla, jsou to materiály, které mají za cíl spojovat konstrukční elementy. Pojidla mohou být tvořena například termoplastickými polymery, různými druhy nízko tavitelných slitin nebo například mědí. Kovové materiály potřebují ke svému spojení mnohem vyšší vnesenou energii, než-li například polyamidové prášky, ale výsledek se odrazí v konečném dílu. Výsledná pórovitost struktury se odvíjí především od druhu použitého pojidla, v praxi lze tak počítat s rozsahem od 0 až do 40%. Vytisknuté 3D modely z kovových prášků mají vlastnosti velice podobné nebo se alespoň velice přibližují k materiálům, které byly vyrobeny tradičními (konvenčními) postupy. Modely vytvořené z kovových prášků dále ve většině případů pyšní například lehkou obrobitelností nebo například svařitelností (nejčastěji pomocí metody TIG). Základní přehled kovových prášků, se kterými se lze často v praxi setkat je uveden níže. [7] [8] [10] [13]



Obr. 41 Praktická ukázka kovových modelů vytvořených metodou SLS [31]

### Nerezová ocel 316L

Velice populární materiál využívaný v oblasti 3D tisku, především pro jeho dobré mechanické vlastnosti. Dále samozřejmě vyniká odolností vůči korozi a mezi jeho další výhody patří relativně jednoduchá svařitelnost. [29] [13]



### Nástrojová ocel H13 (W.Nr.1.2344)

Vyazuje především vysokou odolnost vůči vysokým teplotám a opotřebením. Je správnou volbou například pro výrobu forem, vložek, či výrobu tvářecích nástrojů. [30] [13]

### Nástrojová ocel D2

Jedná se o ocel s vysokým obsahem uhlíku a chromu. Může nabídnout vysokou tvrdost a otěruvzdornost. Využívá se nejčastěji pro výrobu řezných nástrojů. [30]

### Inconel 625

Tento materiál kombinuje dvě především specifické vlastnosti, vysokou pevnost a výjimečnou teplotní odolnost. Často se o ní mluví jako o super slitině. Najde své využití v oblasti výroby tryskových motorů, lékařství nebo i v kosmonautice. Její značnou nevýhodou může být její těžká obrobiteľnosť. [30]

### Titan (Ti-6Al-4V)

Materiál najde své využití především u konstrukčních dílců, které vyžadují vysokou pevnost v tahu, nízkou hmotnost a korozivzdornost. Své uplatnění najde například v leteckém průmyslu. [30]

Dalším populární materiál je měď, a to díky své dobré elektrické a tepelné vodivosti. Využití najde například v elektrotechnickém průmyslu. V oblasti 3D tisku se lze setkat s aplikací mědi pro výrobu speciálních nástrojů pro elektroerozivní obrábění (složitější nástroje, kde se nevyplatí obrábění). Mezi další populární kovové materiály, které jsou využívány v oblasti 3D tisku, mohou dále patřit například hliníkové oceli (např. AlSi10Mg), vysoko-pevnostní oceli (např. maragin steel) a další druhy nástrojových ocelí. [13]

Výběr práškových materiálů je opravdu rozmanitý. Kromě plastových a kovových prášků tu máme další různé druhy materiálů, například na bázi keramiky. Tyto se vyznačují vyšší pevností a otěruvzdorností. Nevýhodou, v některých případech, může být jejich vyšší křehkost a nižší houževnatost. Své typické využití najdou především v obráběcím průmyslu (výroba nástrojů). Ovšem, lze se setkat i s aplikací v oblasti zdravotnictví, kde se využívají například sklo keramické prášky pro výrobu syntetických kostí. [5] [8] [13] [18]



Obr. 42 Ukázka vyrobených modelů syntetických kostí pomocí aditivní výroby [31]

### 1.4.3 Fotopolymery

Stavební materiály v podobě tekuté pryskyřice jsou především využívány u Stereolitografie. Tedy u metod DLP a SLA viz kap. 1.2.4. Jedná se o kapaliny citlivé na UV záření. Po vystavení vůči cílenému působení světlu dochází k jejímu vytvrdnutí. Mezi nejrozšířenější druhy pryskyřice, které jsou využívány ve stereolitografii, patří tzv. akrylátové, ale lze se setkat i s jinými druhy. Stavební materiály jsou rozdělovány do třech pomyslných skupin. <sup>[13] [30]</sup>

#### Pryskyřice pro běžné použití

Pryskyřice v této kategorii nabízí relativně dobrou jakost (kvalitu) povrchu, lze vytvářet modely s velkým smyslem pro drobné detaily. Nákupní cena kapaliny je nízká, na modely nejsou kladeny žádné vysoké mechanické nároky. Výrobky jsou využívány v oblastech, kde je především kladen důraz na desingovou stránku modelu (návrh tvaru prototypu). <sup>[30]</sup>



Obr. 43 Fotopolymer Standart BLED, běžně používaný typ

#### Transparentní pryskyřice

fotopolymeru 1000ml, cena 1000 Kč a výše <sup>[31]</sup>

Jak už z názvu vyplývá, jde o pryskyřice, jejímž výsledkem jsou průhledné nebo částečně průhledné modely. Pevnostní charakteristiky jsou obdobné jako u pryskyřic pro běžné použití. Své uplatnění najdou například u prototypových sestav, kde umožňují transparentní dílce náhled dovnitř. <sup>[10]</sup>

#### Pryskyřice pro konstrukční účely

Modely vytvořené touto metodou dosahují daleko lepších mechanických vlastností. Často bývají plněny ještě navíc dalšími speciálními složkami, díky kterým dosahují ještě vyšší pevnosti nebo odolnosti vůči tečení. Jejich nevýhodou může být zvýšená křehkost. <sup>[10]</sup>

#### Pryskyřice využívány ve zdravotnickém průmyslu

Jde o speciálně navržené pryskyřice, které jsou v první řadě vůči lidskému tělu nezávadné. Své uplatnění najdou především ve zdravotnictví jako zubní náhrady, různé rekonstrukční implantáty a jiné. <sup>[10]</sup>



## 1.5 Finální úpravy modelů vytvořených AV

Jedná se o operace, které jsou prováděny až po ukončení vlastní výstavby 3D modelu. Jde tedy o tzv. postprocessing (viz. kapitola 1.3.3). Primárním cílem těchto operací může být například očištění modelu, zbavení výtisku přebytečného materiálu (podpůrné konstrukce), zlepšení vizuálních a mechanických vlastností nebo například spojení více modelů k sobě. V následující kapitole budou rozepsány základní dokončovací operace, s nimiž se lze v praxi setkat. [32] [31] [10]

### 1.5.1 Omílání

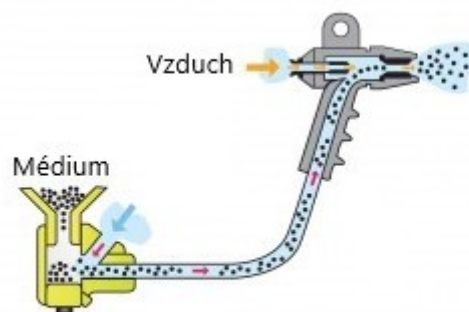
V základu se jedná o chemicko-mechanický proces, při kterém dochází k opracování součásti. V pracovním prostoru (nádobě) se vůči sobě pohybují brusná tělíska a obrobky v přítomnosti procesní kapaliny. Díky tomuto dochází jak k mechanické úpravě povrchu (odjehlování, odhroťování, vyhlazování, atd.) tak i zároveň například k odmašťování, konzervování, čištění nebo například leštění. Omílat lze řadu různých materiálů, ale v souvislosti s AV se jedná především o kovy, plasty, gumy a keramiku. [32]



Obr. 44 Praktická ukázka z procesu omílání [31]

### 1.5.2 Tryskání

Metoda slouží primárně k úpravě povrchu modelu nebo jeho očištění. Princip technologie je založen na postupném opracování povrchu, ke kterému dochází vlivem cíleného dopadu proudu částic. Jako základní pracovní médium lze například použít stlačený vzduch nebo vodu, kam jsou navíc přiváděna tryskácká tělíska. Může jít o kovové broky, písečné zrno a jiné. Intenzita výsledného otryskaného předmětu je závislá na více faktorech, jde o velikost zrna, jeho tvrdost, pracovní tlak (výsledná kinetická energie dopadajícího zrna), vzdálenost pracovního nástroje od povrchu nebo například úhel, pod kterým je obrobek (model) opracováván. [32]



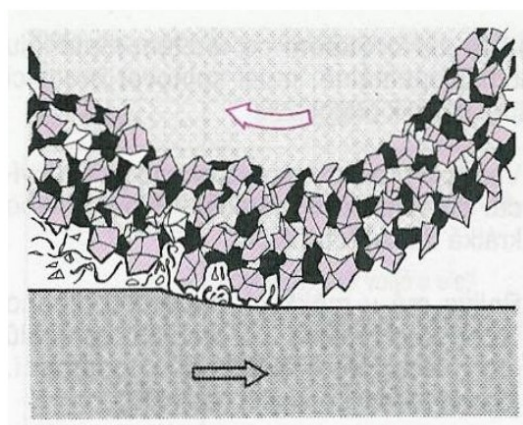
Obr. 45 Princip tryskání, pracovní médium vzduch [31]

### 1.5.3 Lepení

Jedna z poměrně častých operací, která své využití najde především u modelů, dosahujících větších rozměrů a nelze je vytisknout najednou. Musí tedy být rozděleny na jednotlivé dílce (vytištěny) a následně spojeny pomocí lepených spojů. Jde o technologický proces, jehož výsledkem je nerozebíratelný spoj. Mezi hlavní výhody lepeného spoje patří zejména jednoduchý postup práce, možnost spojení rozdílných druhů materiálů, relativně dobrá pevnost spoje s ohledem na množství vneseného materiálu do spoje. K nevýhodám této technologie lze zařadit delší čekací dobu pro vytvrzení lepidla, nižší teplotní odolnost, vyšší nároky na přípravu (očištění) pracovních ploch nebo nižší odolnost vůči působení určitým typům mechanického zatížení (například krutu). [6] [32]

### 1.5.4 Broušení

Broušení je jedna z nejčastěji používaných dokončovacích operací v oblasti AV. Při tomto procesu dochází k postupnému ubírání materiálů za působení mnohobřitého nástroje (Obr. 46). Používá se k dosažení přesnějších rozměrů, lepší jakosti povrchu nebo například ke zlepšení geometrických parametrů modelu. Drsnost povrchu po zbroušení se může pohybovat v rozmezí  $R_a$  od 0,2 až 1,6  $\mu\text{m}$ . [32]



Obr. 46 Základní princip broušení [31]

### 1.5.5 Leštění

Jedná se o technologii, kde stejně jako u broušení za postupného úběru materiálu, dochází ke zvýšení jakosti povrchu a k celkovému zlepšení vizuální stránky modelu (obrobku). Leštění bývá často zařazeno do výrobního procesu jako příprava pro další dokončovací operace. Mohou jsem patřit například operace jako chromování, niklování, popřípadě další různé chemické úpravy povrchů obrobků. Leštění lze rozdělit do tří základních skupin mechanické, chemické a na elektrochemické. [32]



Obr. 47 Vybavení pro mechanické leštění, leštící kotouče [31]

### 1.5.6 Lakování

Je to technologický proces, při kterém dochází k souvislému nanášení nátěrové hmoty na dílec. Cíle a funkce těchto nátěrových hmot mohou být velice odlišné v závislosti na vybraném druhu nátěrové hmoty, či například způsobu aplikace. V praxi jsou nátěrové hmoty rozdělovány do dvou základních skupin. První skupinou jsou laky, jejímž cílem je poskytnout určitou ochranu modelu před vnějšími vlivy. Nátěry tedy především prodlužují životnost ošetřených dílců. Poskytují také antikorozi ochranu, ochranu vůči UV záření, ochranu vůči chemickému vystavení a mnohé další. Druhá skupina nátěrových hmot nabízí ošetřeným modelům především lepší vzhled a design. Tyto laky tedy slouží ke zlepšení vizuální stránky ošetřeného modelu. Pro obě dvě skupiny lze použít různé druhy technik nanášení nátěrových hmot. Může to být například ruční barvení, stříkání, máčení nebo polévání. Každá z uvedených metod s sebou nese určité výhody a nevýhody, které je nutné zvážit před aplikací samotného laku. Často je nutné před nanášením barviv obrobek důkladně připravit, očistit, zbrousit, leštit, případně vyrovnat povrch speciálními tmely nebo plniči. [32]



Obr. 48 Ukázka ručně lakovaného model vyrobeného AT [31]

### 2.5.7 Povlakování

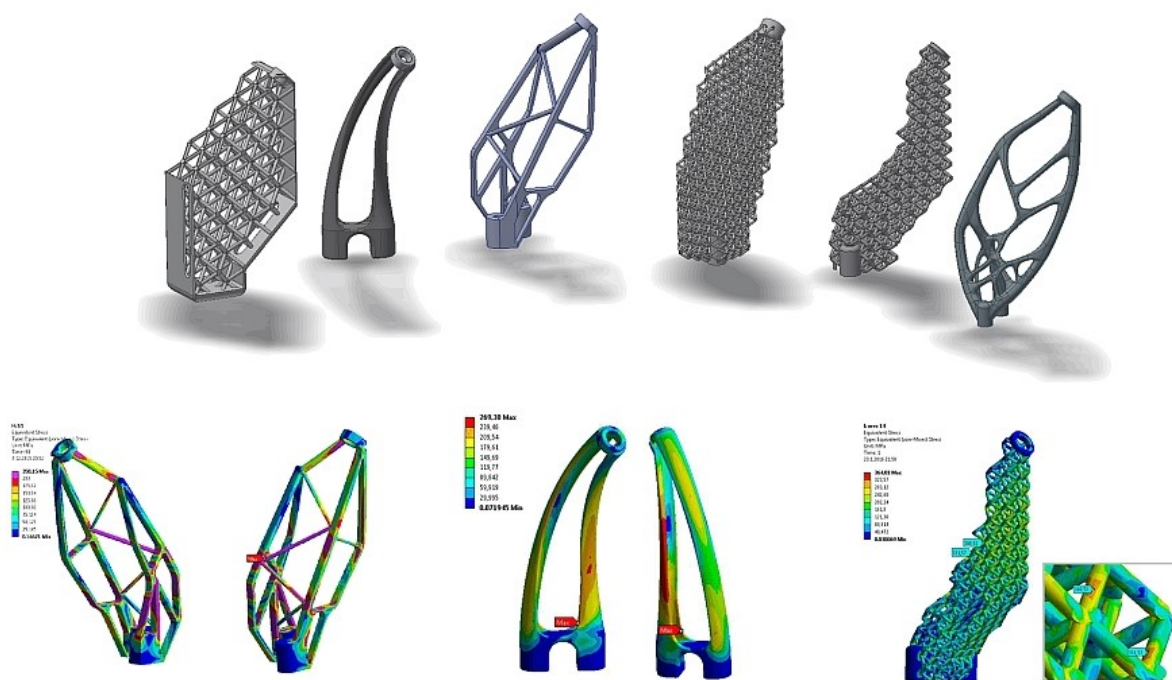
Cílem povlakování je nanést na model tenkou souvislou vrstvou, jejímž cílem je poskytnout ošetřenému výrobku lepší mechanické vlastnosti, odolnost vůči tepelnému a chemickému působení, odolnost vůči otěru nebo vylepšit vizuální stránku vyráběného předmětu. Mezi nejznámější způsoby povlakování patří například chemické nebo galvanické. Dále jsou využívány i další speciální metody, jako jsou CVD (Chemical Vapour Deposition), či PVD (Physical Vapour Deposition). [32]



Obr. 49 Výrobní linka pro galvanizační pokovení [31]

## 1.6 Optimalizace konstrukce

Cílem každého projektanta je navrhnout konstrukci tak, aby obstála všem požadavkům, které jsou na ni kladeny. Konstruktor tedy musí projít řadou složitých a náročných procesů, do nichž musí zahrnout veškeré faktory, které se k dané problematice stahují nebo ji určitým způsobem ovlivňují. Optimálním výsledkem by měla být konstrukce s garantovanou životností a užitečnou hodnotou. Předpokladem pro vytvoření co nejlepšího návrhu je dopracovat se k takovému výsledku, jenž se v konečné fázi návrhu co možno nejvíce přiblíží k limitním hodnotám upřednostňovaných aspektů v daném projektu. Tím je myšleno dosáhnout například minimálních nákladů pro výrobu, minimální hmotnosti konstrukce, maximální tuhosti soustavy, jednoduchosti výroby, nebo umožnit co možno nejdelší životnost konstrukce. Na obr. 50 lze vidět různé příklady a verze optimalizovaných konstrukcí, které byly navrženy odlišným způsobem, jsou tu využívány příčné nosníky, mikroprutové soustavy nebo na příklad bionické prvky. [13] [14] [21]



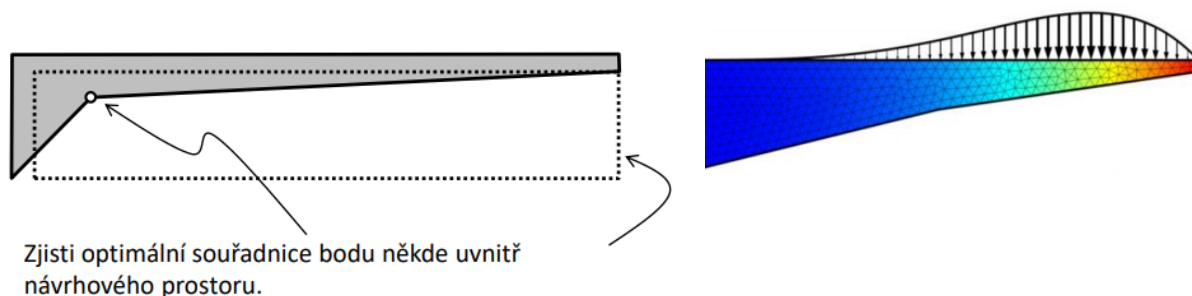
Obr. 50 Příklad optimalizace nosníku určených pro výrobu technologií SLM [17]

S ohledem na navrhované proměnné, tedy hodnoty, či aspekty, s nimiž je primárně manipulováno (například rozměry, polohy hotové CAD geometrie, tvar hranic, rozložení materiálu a jiné), se lze v praxi setkat se třemi základními druhy optimalizace konstrukce. Jednotlivé metody optimalizace budou rozebrány v následujících kapitolách. Každá z uvedených metod má své určité výhody a nevýhody, s nimiž je při návrhu konstrukce nutné počítat. [17] [16]



### 1.6.1 Rozměrová optimalizace

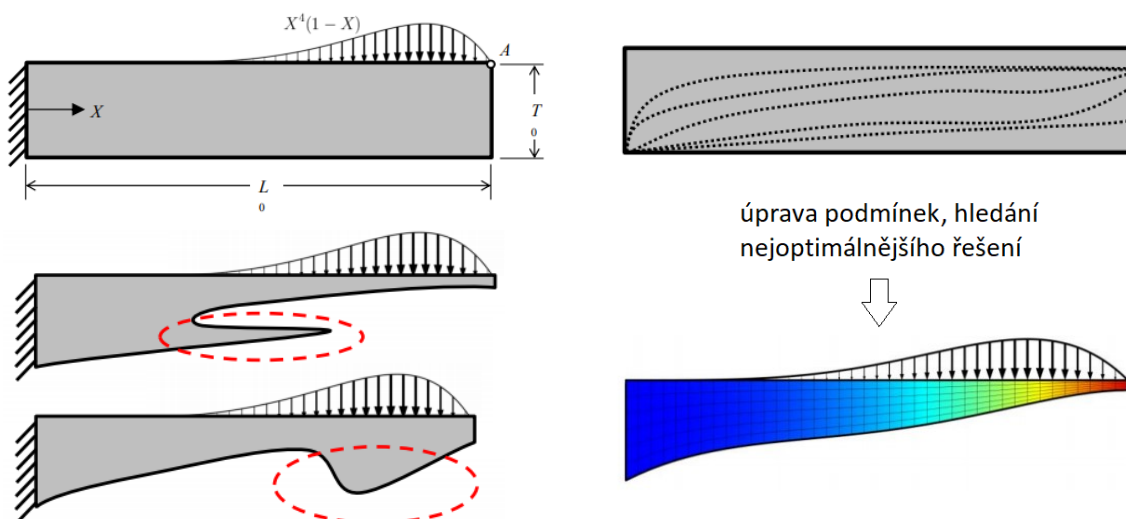
Používá se především u jednodušších konstrukčních návrhů. Pracuje s geometriemi CAD modelů. Mezi její výhody patří její jednoduchost nastavení a práce s ní. Její výpočetní rychlost není vysoká, pro svou práci používá tzv. gradient-free, jedná se o nediferencovatelnou cílovou funkci, která se v praxi využívá u návrhů, do nichž vstupuje méně proměnných ( $<10$ ). Výpočetní čas narůstá exponenciálně s přibývajícím počtem proměnných. Během výpočtu dochází k přesítování modelu v každé interakci. [22]



Obr. 51 Příklad optimalizace nosníku pomocí rozměrové optimalizace [22]

### 2.6.2 Tvarová optimalizace

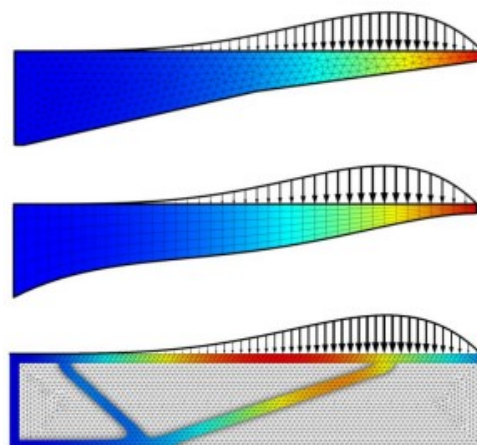
Jedná se o složitější metodu, cílem je odebrat přebytečný materiál z existujícího výrobku. Během tohoto procesu dochází ke změně tvaru hranic modelovaného objektu. Je tu vyžadováno složitější zamyšlení nad formulací problému. Výhodou dané metody je, že tu není vyžadováno přesítování. Výsledná rychlost výpočtu je tedy rychlejší, než u metody rozměrové optimalizace (výpočet gradientu tu probíhá analyticky). Nevýhodou této metody je, že jsou tu vyžadovány určité zkušenosti pro účelnou práci s ní (obrázky vlevo příklad nevhodného výsledku, zaviněným nesprávným přístupem k danému problému). [22]



Obr. 52 Příklad optimalizace nosníku pomocí tvarové optimalizace [22]

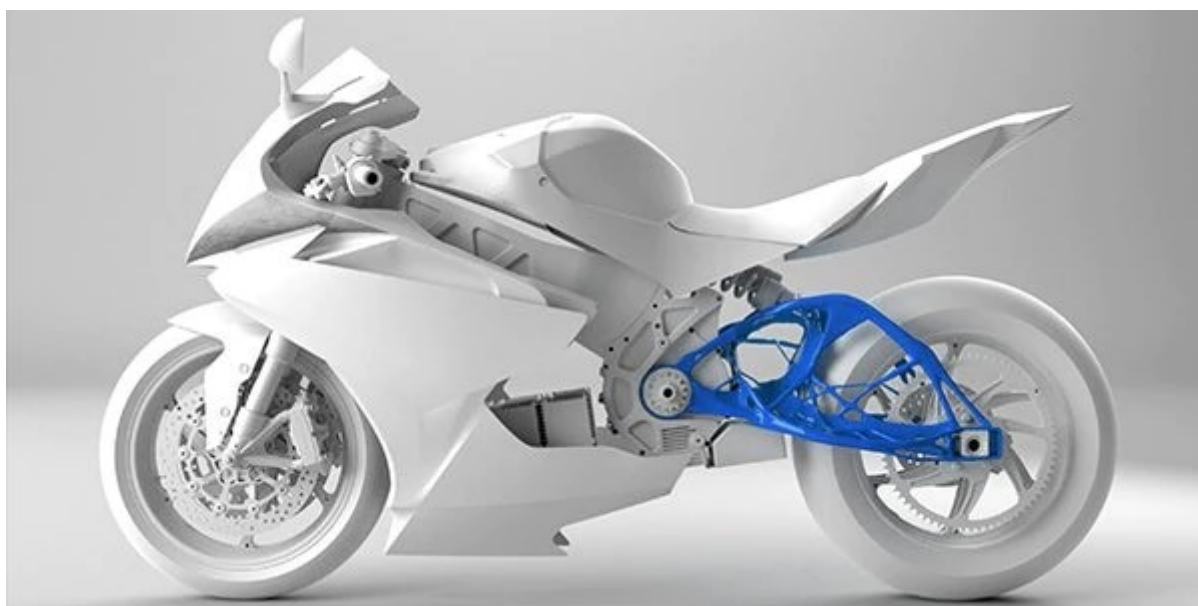
### 1.6.3 Topologická optimalizace

Topologická optimalizace představuje jeden z novějších konceptů návrhu výroby konstrukce výrobků. První počátky, které jsou spojovány s problematikou topologické optimalizace lze zpětně dohledat do roku 1904, kdy se známý Australský vynálezce zabýval optimalizací rozložení nosníkové konstrukce, tak aby byla výsledná hmotnost co nejmenší. Pro lepší představu jak tato metoda pracuje, je na obr 53 znázorněn příklad optimalizace nosníku. <sup>[19] [22]</sup>



Obr. 53 Příklad optimalizace nosníku, pro topologickou optimalizaci <sup>[22]</sup>

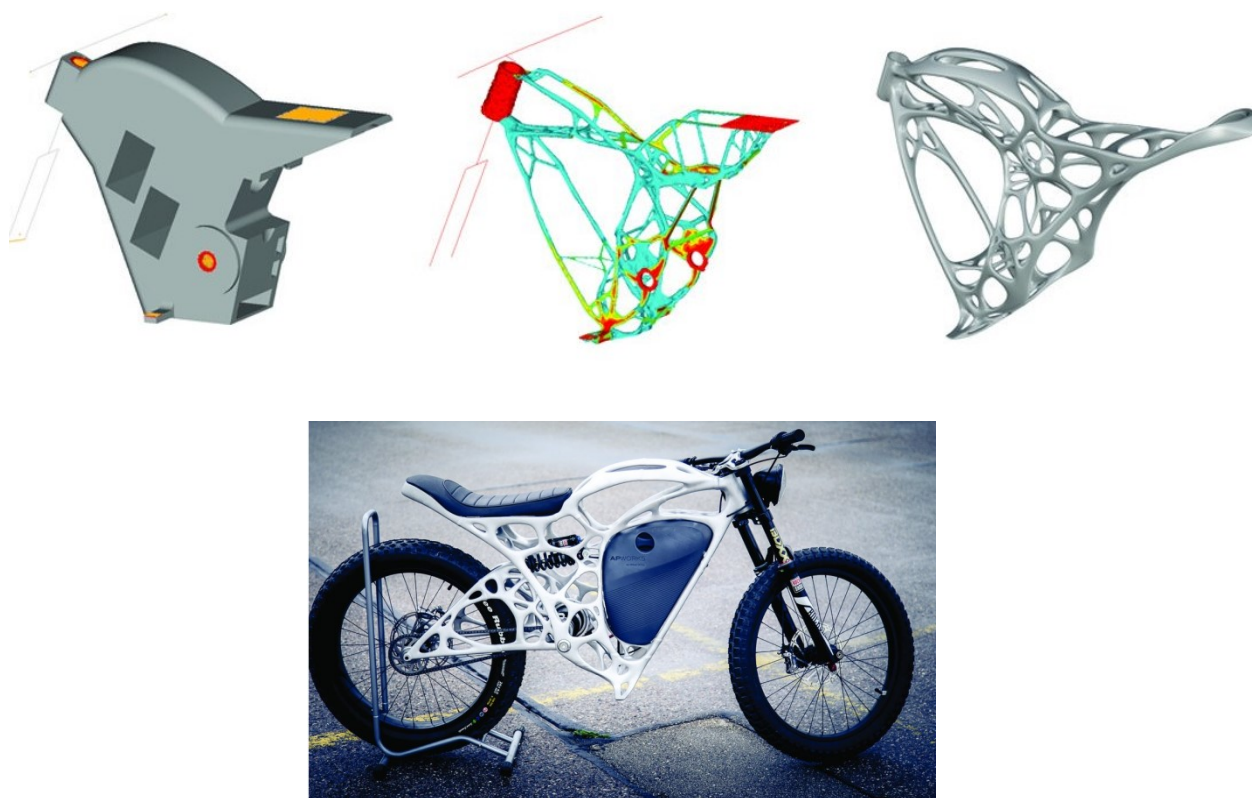
Způsob práce topologické optimalizace je výrazně odlišný od běžného přístupu k návrhu konstrukce. U klasického projektu konstruktér v první řadě určí tvar součásti a následně pak prověřuje, zda navržená součást splňuje zadané požadavky, které jsou na ni kladeny. Naopak u topologické optimalizace lze nejprve zadat způsob, jak daný díl bude zatěžován, namáhán a v jakém prostoru může být materiál vygenerován (pracovní hranice). Na základě matematických a mechanických výpočtů výpočetní systém stanoví a navrhne tvar konstrukce s co možno nejlepším materiálovým uspořádáním, který respektuje počáteční podmínky, jež byly stanoveny. <sup>[22] [23] [26]</sup>



Obr. 54 Příklad možnosti aplikace topologické optimalizace, odlehčení zadního ramene motocyklu <sup>[31]</sup>

(výsledek se výrazně projeví, jedná se o aktivní váhu zadního uchycení kola)

Konstruktor tedy v první řadě navrhne tvar dílu bez jakéhokoli odlehčení, vytvoří základní plný tvar dílce (materiálové hranice) a stanoví místa, kde bude výrobek upevněn a lokace, které budou během provozu vystaveny zatížení (obr. 55). S ohledem na to, že navrhovaná konstrukce může být vystavena různým druhům působícího namáhání (tah, krut, ohyb, tepelné zatížení a jiné), lze vygenerovat nepřeberné množství typů konstrukcí. Je důležité brát v potaz také výrobní technologii, kterou je v plánu využít pro výrobu daného dílce, neboť každá výrobní metoda má své meze (způsoby a možnosti práce s materiálem pro danou stavbu konstrukce). Běžně se určí minimální a maximální tloušťka materiálu, symetrie konstrukce (tvar), způsob odebrání hmoty (tak, aby bylo možné dílec vyrobit) nebo například upravit hranice odebíraného materiálu (odebírání materiálu skrze celý díl nebo například vytváření vnitřních dutin). [13] [14] [23]

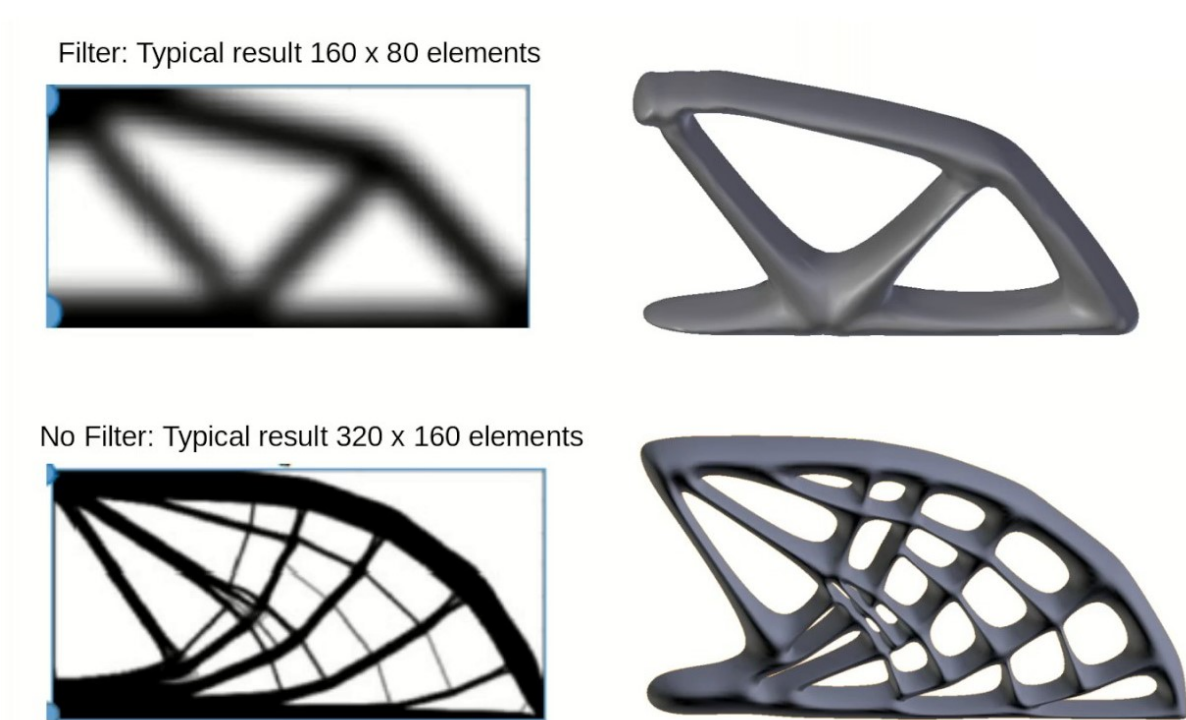


Obr. 55 Ukázka topologické optimalizace, hlavní rám elektrického motocyklu [19]

S ohledem na vložené podmínky software provádí sérii výpočtů a vyhodnocuje, jakým způsobem jsou zatěžována jednotlivá místa konstrukce. Softwary pracují s řadou výpočetních sítí, které jsou postupně upravovány tak, aby elementy s nízkými hodnotami byly postupně odlehčovány, či jinak modifikovány. Výsledkem by tedy měla být konstrukce s požadovanou mírou odlehčení, správnou tuhostí a odolností. Díky tomu topologická optimalizace otvírá nevídané možnosti tvorby výjimečných konstrukcí, především v kombinaci s AV. [23]

Protože odvětví topologické optimalizace vnáší do výrobního průmyslu opravdu velký potenciál, je logické, že za posledních pár let došlo k jeho rozsáhlému vývoji. Vzniklo tak velké množství optimalizačních metod, z nichž se některé uchytily, díky jejich odlišným a nápaditým přístupem a naopak některé relativně složité a méně efektivní už nenašly své uplatnění. Mezi nejznámější výpočetní metody, s nimiž se lze často setkat jsou EOS (Evolutionary Structural Optimization), ASE (Anisotropic Solid or Empty element), SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization) nebo například NOM (Optimization of Method for Detecting and Characterizing).<sup>[12] [25]</sup>

Jednou z nejoblíbenější matematickou metodou pro stanovení optimální topologické konstrukce je metoda SIMP. Za zakladatele této metody jsou považováni autoři Bendsoe a Kikuchi (1988) a Rozvany a Zhou (1992). Cílem metody SIMP je předpovídat optimální rozložení materiálu uvnitř návrhového prostoru pro zadané parametry. Dle publikace Bendsona (1989): „*optimalizaci tvaru v tom nejobecnějším nastavení má tvořit určení tvaru v každém bodu nezávisle na tom, zda se v něm materiál nachází či ne*“. V praxi jde o metodu, jejímž výsledkem je mapa bodů (elementů), ke kterým je účelně na základě provedených výpočtů přiřazena jejich hustota (v rozmezí od 0 do 1). Na Obr. 56 lze vidět navrhnuté nosníkové konstrukce právě metodou SIMP. Počáteční podmínky (zatížení) jsou pro oba nosníky stejné, liší se pouze v provedeném nastavení výpočtového softwaru.<sup>[23] [25]</sup>



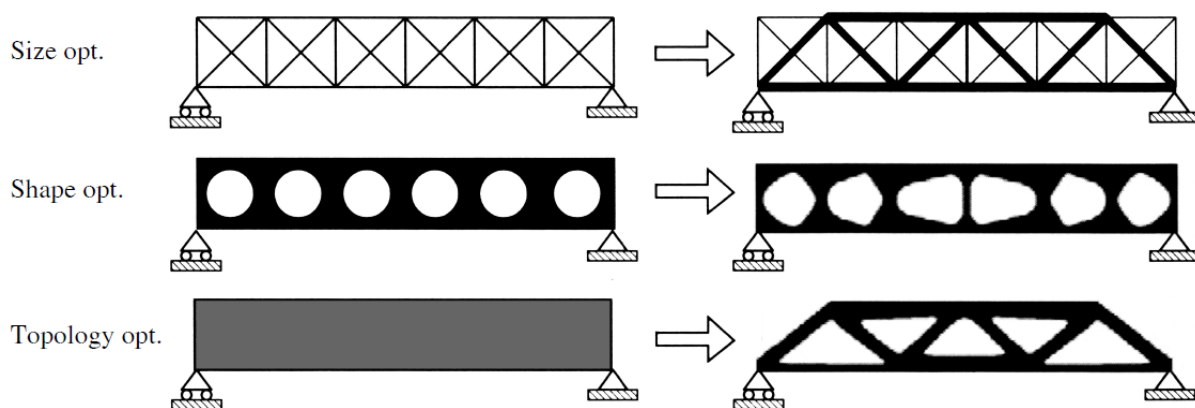
Obr. 56 Výsledky optimalizační metody SIMP<sup>[16]</sup>

(liší se zadanými parametry, tedy hustotou pracovních elementů a nastavení filtrů)



### 1.6.4 Porovnání optimalizačních metod

Na obr. 57 můžeme vidět srovnání všech tří základních metod optimalizace, které byly podrobněji popsány v předchozích kapitolách. První z uvedených metod (Obr. 57 nahoře), pracuje především s předem navrhnutou geometrií. Druhou metodou je tzv. tvarová optimalizace. Jak již z názvu vyplývá, základem metody je úprava předem definovaného tvaru tak, aby bylo dosaženo co možno největších materiálových úspor, ale zároveň nedošlo k ovlivnění pevnostních charakteristik potřebných pro funkci konstrukce. Praktickým využitím dané metody, může být například odlehčování hliníkových nosníků v křídlech letadla. Poslední metodou je topologická optimalizace. Hlavní myšlenkou je nejprve vložit vstupní data (hranice, tvar, upevnění, působící síly a jiné) a poté vygenerovat optimální konstrukci. [16] [17] [20]



Obr. 57 Výsledky optimalizační metody SIMP

(liší se zadanými parametry, tedy hustotou pracovních elementů a nastavení filtrů) [16]

### 1.6.5 Bionické prvky

Bionika je věda, zabývající se výzkumem biologických systémů. Za svůj vzor samozřejmě považuje živé organismy, na kterých zkoumá specifický typ energetického a strukturálního uspořádání. Dále se zabývá i jejich technickou stránkou, tedy například schopnosti organismů se adaptovat na měnící se podmínky v jeho okolí. Hlavní myšlenkou je využít (podchytit) specifické mechanismy přírody a převést je do praktického využití. [13] [15]

Bionika se řadí k relativně mladším vědním oborům. Jeho počátky se datují ke konci padesátých let. Po ukončení druhé světové války došlo k velkému rozvoji biologických oborů.

Oficiálně byl tento vědní obor uznán v roce 1956 na konferenci, jejímž jedním z cílů bylo zhodnotit vliv využití biologických systémů v technických oborech. [15] [33]

K nevídanému rozvoji bioniky došlo především na přelomu 19. a 20. století. Obzvláště v oborech stavebních, tedy v architektuře. Na mnoha vystavěných dílech lze pozorovat určitou analogii, především si berou ze svých předloh určité přednosti, které využívají pro svůj prospěch (Obr. 58). Avšak využití bionických prvků nezůstalo pouze u architektury. Své další využití našla například v oblastech robotiky, kde vznikla řada robotů, napodobujících pohyb běžných živočichů například plazů, šelem a ptáků. [33]



ulita - schodiště

robot-spot mini Boston Dynamics

přeslička - výšková stavba

Obr. 58 Ukázka využití bionických prvků v praxi [31] [33]

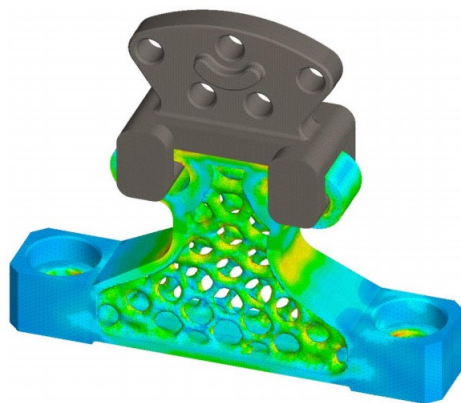
V neposlední řadě hraje velkou roli účast bionických prvků také v konstrukčních návrzích. Nejčastěji bývá spojována s topologickou optimalizací (viz. kap 2.6.3). Jedná o velice populární styl konstrukčního návrhu, který v poslední době zažívá opravdový rozkvět a je velice popularizován. Výroba takto navržených konstrukčních dílců bývá realizována nejčastěji AV. Výsledná cena produktu vyrobených AT nabývá ve většině případů vyšších hodnot. Své uplatnění tedy najde tam, kde je kladen opravdu velký důraz na hmotnostní úsporu a pevnostní charakteristiky. Praktický příklad je vyobrazen na obr. 59 jedná se třmeny vytištěné metodou SLS pro Bugatti Chiron. Konstrukce vyniká svojí hmotností, tuhostí a výjmečnou tepelnou odolností. [32] [20]



Obr. 59 Brzdové třmeny z Bugatti Chiron, vyrobeny metodou SLS z titanové slitiny [31]

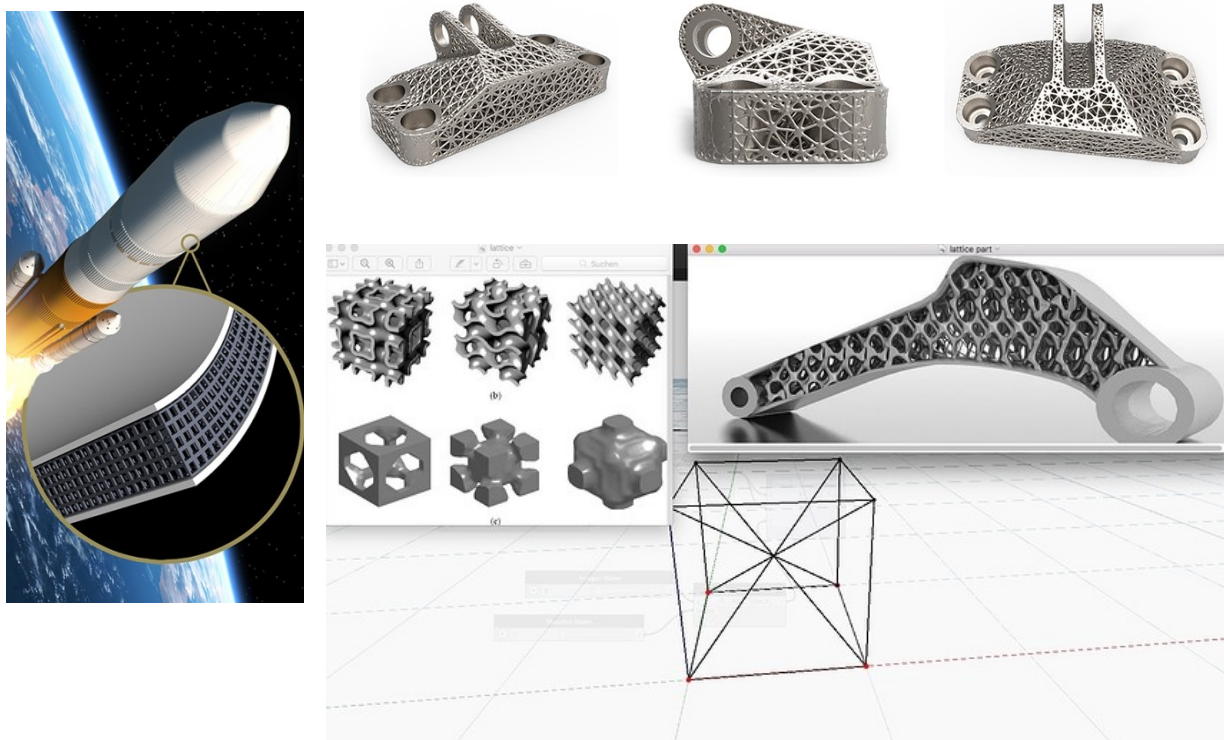
## 1.6.6 Mikroprutová struktura

Často se lze v kombinaci s AV a topologickou optimalizací (Obr. 60) se lze setkat s pojmem mikroprutová soustava, anglicky je označována jako lattices structure. Jedná se o stavbu s pravidelně se opakujícím buněčným uspořádáním, jejímž výsledkem je struktura připomínající krystalickou mřížku (Obr. 61). I v tom to případě jde o jeden z vynálezů, který byl inspirován přírodou (viz. kap. 1.6.5.) Díky této speciální strukturované stavbě získávají materiály specifické vlastnosti, které jsou především užívány v oblastech vesmírného, leteckého a automobilového průmyslu. [12] [15]



Obr. 60 Využití mikroprutové soustavy [12]

Hlavní výhodou těles obsahujících latt struktu je snížení jejich hmotnosti, aniž by byly výrazně ovlivněny jejich pevnostní charakteristiky. Dále je tyto materiály vhodné použít na místech, kde lze počítat s nutností absorbování energie, neboť struktura umožňuje velice efektivní a rovnoměrné pohlcování vnesené energie. Nevýhodou mikroprutových struktur, může být jejich obtížnější výrobitelnost, proto se s nimi lze setkat většinou jen výhradně ve spojení AV. Další příklady využití mikroprutové soustavy jsou uvedeny na obr. 60 a 61. [12]

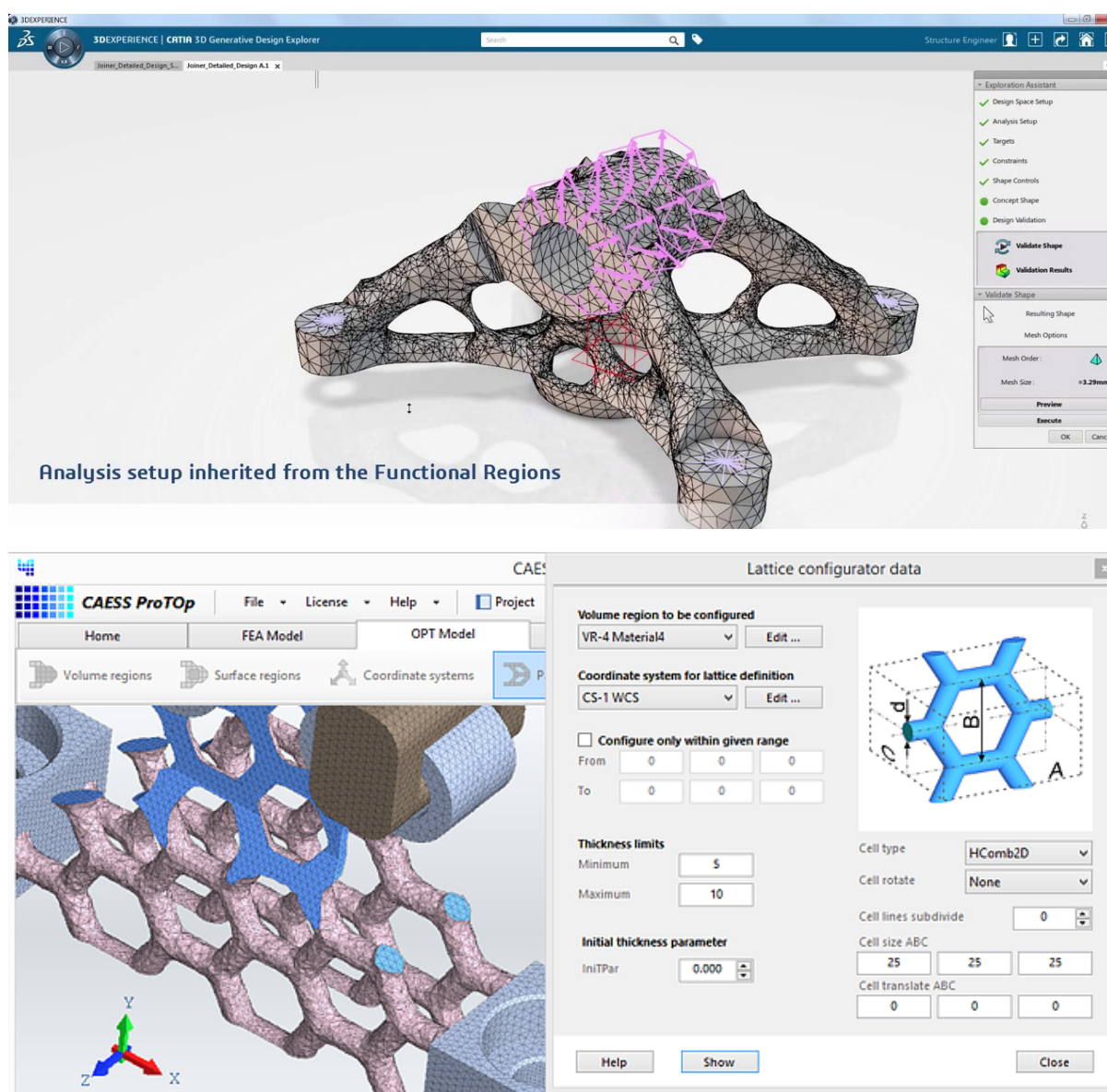


Obr. 61 Příklady aplikace mikroprutové soustavy [12] [15] [31]



## 1.6.7 Počítačové softwary pro optimalizaci

V dnešní době lze vybírat z relativně velkého množství počítačových softwarů, jenž nabízí určitý druh optimalizace výrobní součásti. Některé programy nejsou přímo primárně navrhnuté pro optimalizaci, ale i přesto disponují účelnou podporou v oboru optimalizace. Mezi ně lze zařadit Autodesk Inventor, Solidworks, Creo nebo například Catii.



Obr. 62 Ukázka ze systémového prostředí programů Catia a ProTopu [26] [31]

Na druhou stranu se lze setkat i s programy, které byly primárně navrženy právě pro účelnou optimalizaci a analýzu dané problematiky. Mezi tyto softwary se řadí počítačové programy, jako jsou ANSYS, Abaqus, BESO, Toposcrut, Materialise, ProTop, OptiStruct, CATOPO a mnohé další. [26]

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 Rozbor zadání

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit reklamní předmět, jenž bude na sobě nést určité prvky topologické optimalizace. V kapitole číslo 1.6 je tato problematika podrobněji přiblížena. S ohledem na to, že v minulosti už na půdě strojní fakulty vznikly podobné projekty kombinující aditivní výrobu a topologickou optimalizaci, z nichž některé se věnovaly sportovním tématům. Bylo rozhodnuto, že předmět, jenž bude vyráběn pomocí AV, bude spadat také do tohoto odvětví, aby byla zachována určitá koncepce.



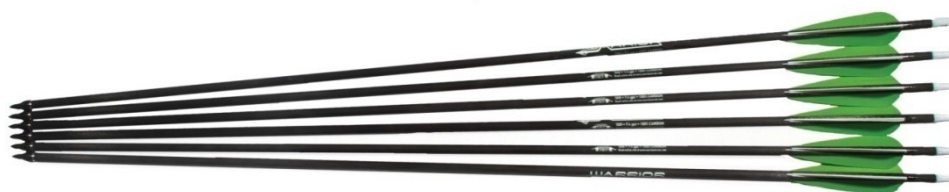
Obr. 63 Příklady předmětů vytvořených na půdě strojní fakulty  
(výroba bionické koloběžky a podvozku ze skateboardu)

Volba tedy padla na výrobu rukojetě skládacího luku, neboť z mého pohledu se jedná o určitě zajímavý předmět se sportovním využitím, který dokáže zaujmout. Zbraně jako takové už od dávných dob vždy budily určitý obdiv a přitahovaly pozornost. Jako základ pro prvotní vytvoření základního 3D modelu se stal tradiční skládací lovecký luk s výrobním označením Jandao Takedown 60" 45lbs. Jak už z názvu vyplývá, jeho natahovací síla činí 45lb, což v přepočtu dává 19,5 kg. Touto hodnotou se luk řadí spíše pro sportovní nebo lovecké využití. Pro představu luky s natahovací silou do 25lb jsou brány jako sportovní předměty pro rekreační využití.



Obr. 64 Skládací luk Jandao Takedown 60" 45lbs

Celková délka luku po napnutí tětivy činí 60", tedy 152,4 cm. Rukojeť luku je koncipována pro úchop praváka (luk je držen v levé ruce, tětiva v pravé). Tělo luku je vytvořeno kombinací dřevin javoru, macore a chuglam. Pružné elementy luku (ramena) jsou vyrobeny z kvalitního sklolaminátu a jejich jádro je tvořeno dalším exotickým druhem dřevin (červená barva). Tětiva luku je vyrobena z živočišného původu (kůže, šlachy), je tedy nutné během provozu provádět určitou údržbu (například mazání tukem, skladování ve tmě a jiné). Vzhledem k většímu výkonu luku je doporučováno používat kvalitnější druhy šípu, které mohou být vyráběny například z karbonu nebo duralu.



Obr. 65 Karbonové šípy, délka šípů se obvykle určuje podle celkové délky luku (polovina z jeho délky), v tomto případě je to tedy 30"

## 2.2 Modelování

### 2.2.1 Výstavba základního 3D modelu

Pro vytvoření základního modelu rukojetě luku, byl vybrán počítačový CAD systém s názvem Autodesk Inventor 2017. Jedná se o velice populární program, který je využíván jak pro výuku ve školách (středních i vysokých) tak i v praxi. Program nabízí v celku přehledné uživatelské rozhraní, stává se tedy efektivním pomocníkem hlavně v oblasti návrhu základních konstrukčních dílců a tvorbě jejich podsestav a sestav.

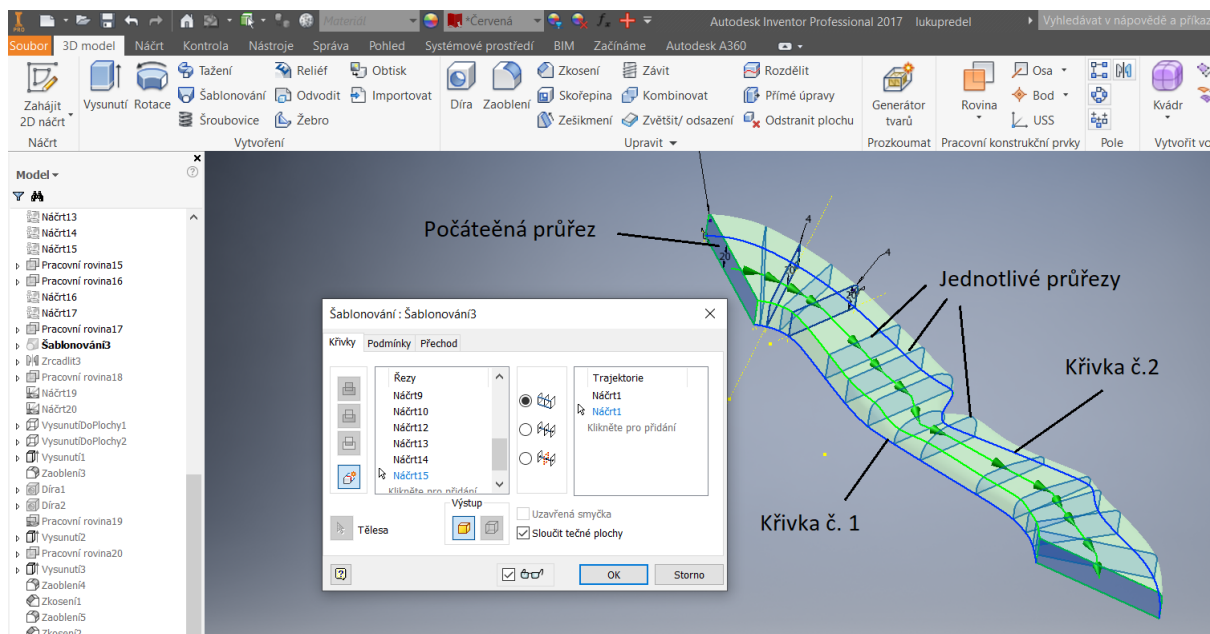
Prvním krokem při návrhu základního tvaru modelu bylo přenesení základní geometrie na papír. Přičemž geometrie tvaru byla lehce upravena taky, aby nabídla elegantnější design a lepší úchop pro ruku. Poté byla přenesena do pracovního prostředí Autodesk Inventor 2017.



Obr. 66 Převedení nákresu do papírové podoby

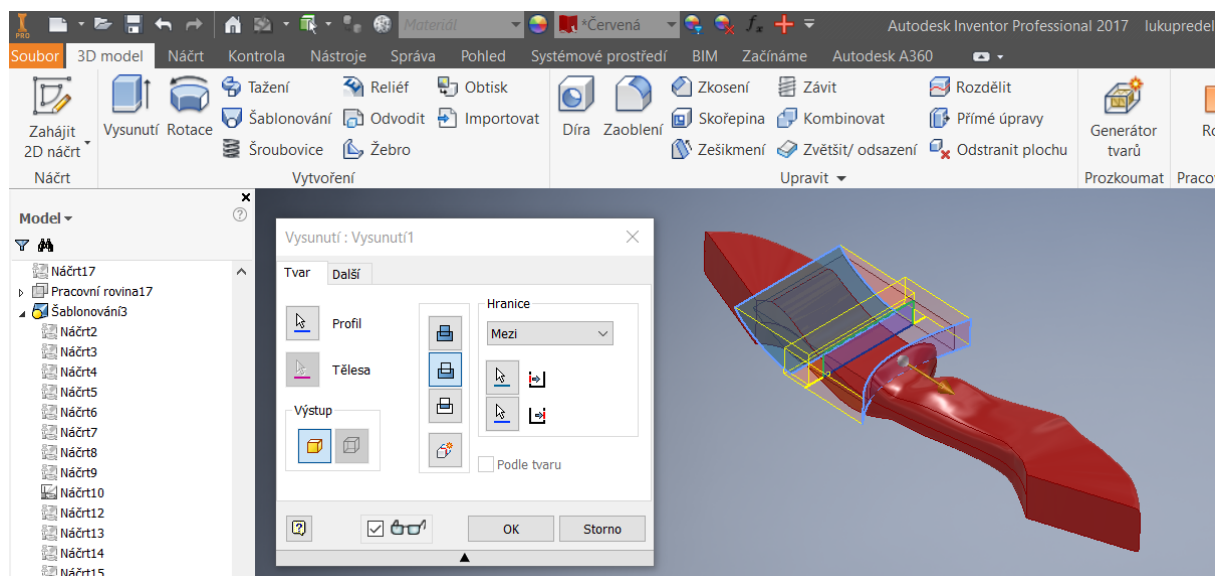


Základem 3D modelu bylo vytvoření nákresu, do něhož byl zanesen půdorys tělesa luku. Ten je tvořen dvěma spline křivkami, které jsou tvarovány řídicími vrcholy. Poté bylo vytvořeno sedmnáct průřezů na sedmnácti různých kolmých rovinách k původnímu nákresu. Takto přichystané nákresy (průřezy) a hraniční křivky byly postupně vybrány pomocí příkazu šablonování, výsledkem byla vygenerovaná polovina základního tvaru tělesa.



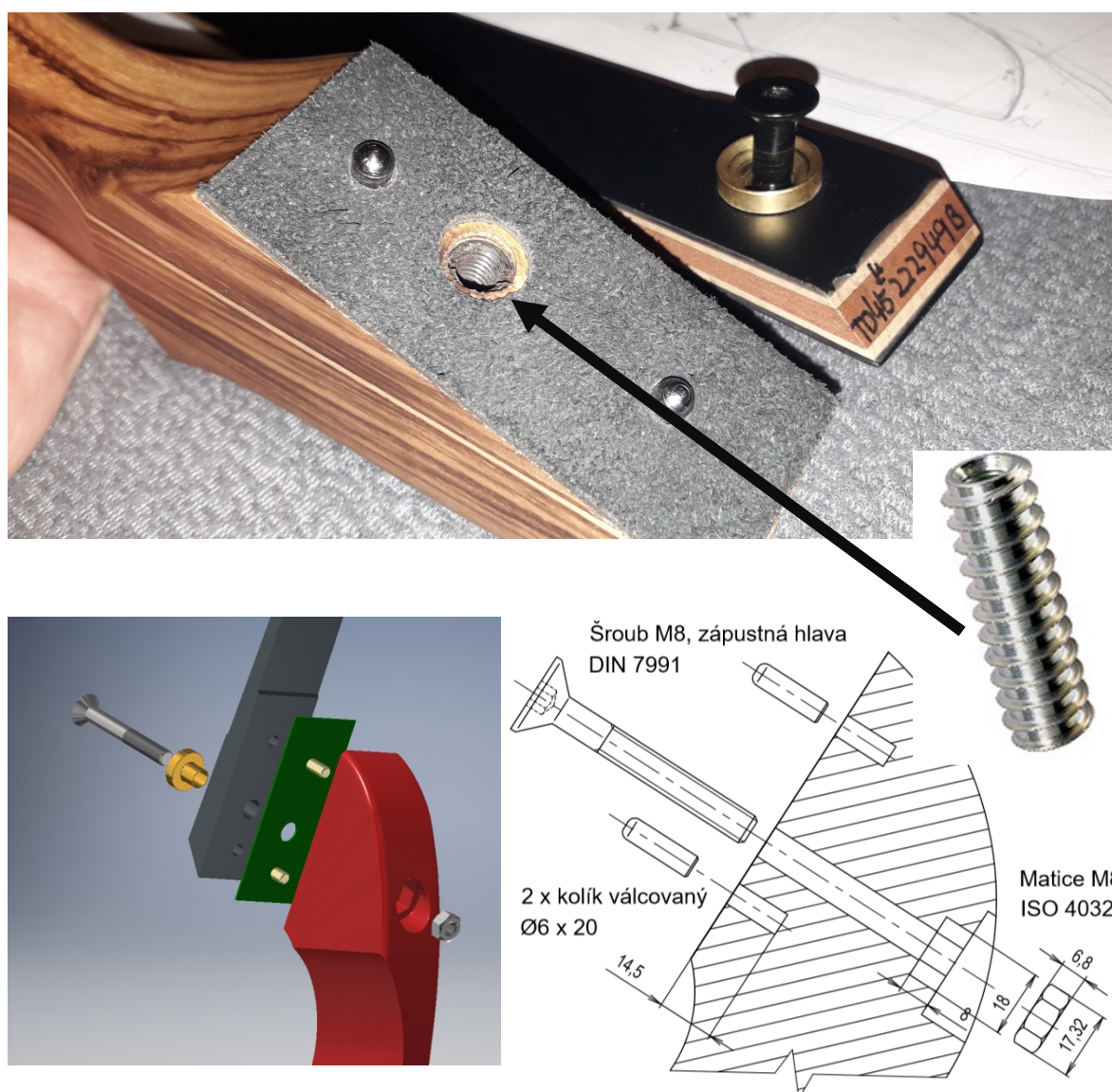
Obr. 67 Práce v programu Autodesk Inventor, příkaz šablonování

Následně za pomoci funkce zrcadlení byl vytvořen plný profil základního tvaru 3D modelu. Posléze, příkazem tažení, došlo k odebrání materiálu v místě výletu pro šíp. (Obr. 68).



Obr. 68 Práce v programu Autodesk Inventor, příkaz tažení

Původní uchycení ramen luku k rukojeti bylo provedeno pomocí dvou kolíků a jednoho šroubu, jenž se uchytil do závitové vložky ve dřevě (Obr. 68 nahoře). Závitové vložky se provádí v mnoha provedeních lze je například aplikovat do zmíněného dřeva, plastů, kovů nebo například do betonu. Vzhledem k tomu, že při aplikaci vložky hrozí znehodnocení otvoru (stržení), bylo rozhodnuto, že se bude muset navrhnout náhradní druh upínání. Jako nejideálnější volba s ohledem na možnost AV se nabízela možnost upnutí ramen luku pomocí šroubu a matice. Pro uchycení matice byl vytvořen speciální otvor v tělese luku (Obr. 69 dole). Výhodou tohoto řešení je fakt, že není třeba dalšího pracovního nářadí pro jeho smontování. Jedná se o relativně jednoduché a efektivní řešení. Komponenty pro sestavení lze sehnat v každém větším železářství.



Obr. 69 Návrh náhradního upínání pro sestavení luku

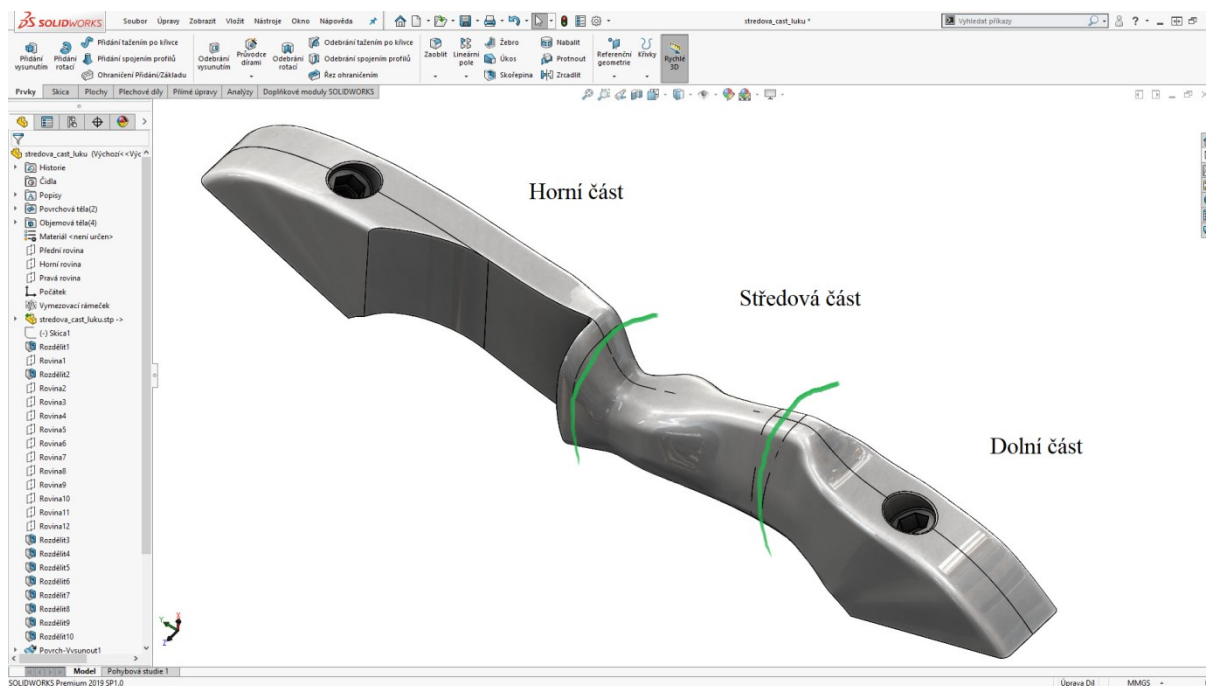
## 2.2.2 Aplikace 3D textury na rukojeť luku

Jedním z dalších kroků, které byly podniknuty na úpravě 3D modelu, byla aplikace 3D textury na rukojeť luku. Cílem nanesení textury je celkové zdrsnění povrchu modelu v oblasti úchopu. Bude tak zajištěno mnohem jistější a pohodlnější držení luku. Jelikož Autodesk Inventor 2017 nenabízí nástroj, který by dokázal vytvořit reálnou 3D texturu (je tu podobný nástroj, ale vytváří jen vizuální dojem textury), musely být další úpravy prováděny v jiném programu a to v softwaru SOLIDWORKS 2019.



Obr. 70 Ukázka aplikace 3D textury v programu SOLIDWORKS

Pro aplikaci 3D textury je důležité nejprve se přichystat jednu celistvou plochu. Prvním krokem bylo rozdělení modelu tak, abychom oblast úchopu izolovali od ostatních ploch. Na obr. 71 lze vidět náčrtek jak toto selektování probíhalo. Výsledkem tedy jsou 3 oddělené části modelu (horní, středová a dolní). Středovou (odizolovanou) část bylo nutno dále upravit, neboť plocha stále nebyla celistvá (během samotného modelování tělesa vzniklo více nesouvislých rovin, například během zrcadlení a jiných modifikací). Toho bylo docíleno pomocí příkazu (úpravy) sešití, došlo tedy ke spojení několika ploch do jedné celolité.



Obr. 71 Příprava modelu pro aplikaci 3D struktury, rozdělení na tři části



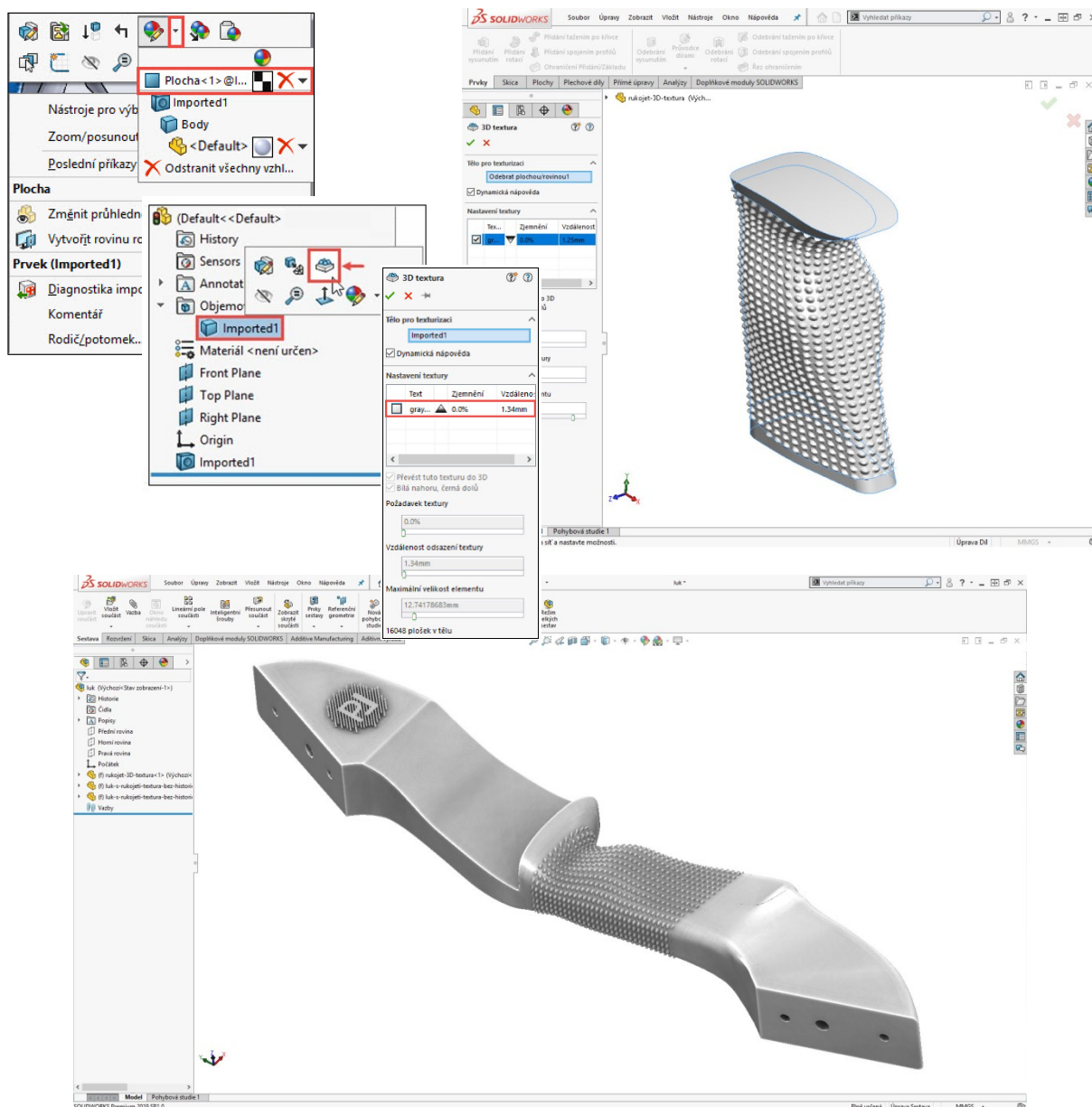
Funkce výstavby 3D textury byla vložena poprvé do systému SOLIDWORKS až v poslední verzi, tedy v roce 2019. Příkaz umí transformovat 2D obrázek (určitou předlohu) do trojrozměrné polohy. Průběh aplikace probíhá následujícím způsobem:

- **Aplikace základního vzhledu textury**

- úprava textury → možnosti vzhled → plocha
- naběhne okno PropertyManageru → 2D mapování textury (úprava parametrů: rozmístění, šířka, rotace, poměr stran a jiné)

- **Aplikace 3D textury**

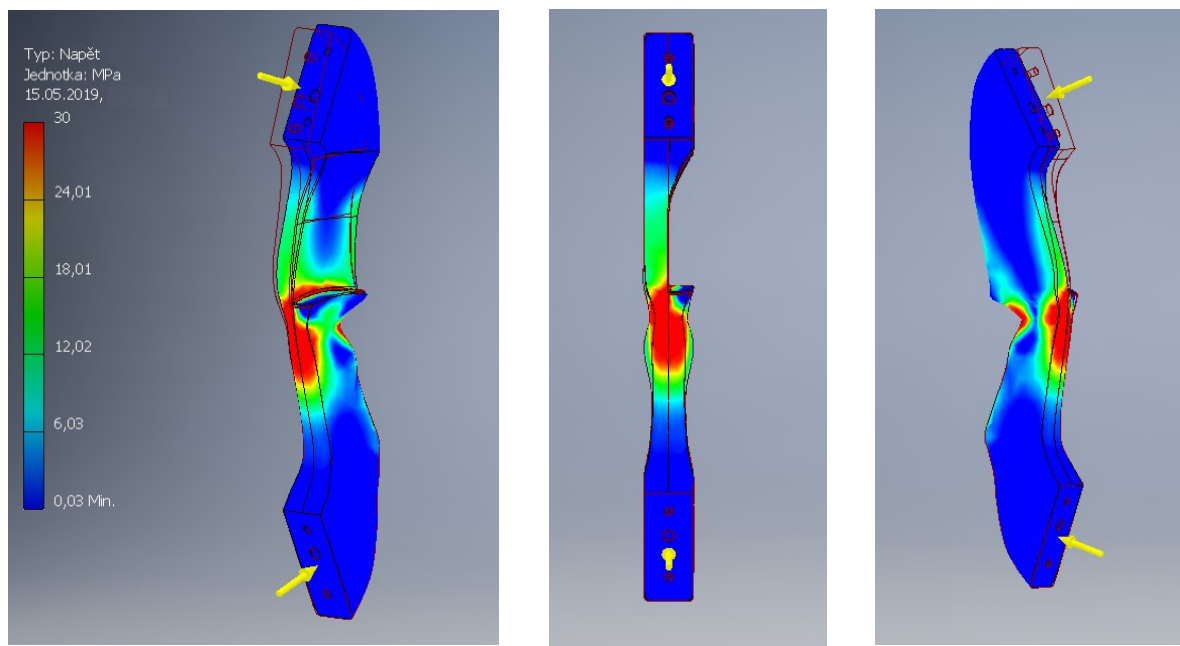
- ve FeatureManageru → otevřeme objemová tělesa → výběr 3D textura
- v okně pak následuje další úprava podmínek, spojených s vygenerováním 3D textury



Obr. 72 Aplikace 3D textury na rukojeť luku

### 2.2.3 Aplikace mikroprutových prvků

Výsledkem této práce má být funkční produkt, což v praxi znamená, že vymodelovaný předmět si musí zachovat určité mechanické vlastnosti potřebné pro jeho provoz. Celkové rozměry rukojetě modelu činí 460 x 100 x 40 mm. Původně pro tisk modelu připadaly dvě možnosti. První z nich uvažovala vytisknout model z kovového prášku, druhá z polyamidu. Jelikož tisk z kovového prášku je nákladný, bylo rozhodnuto, že vyráběný dílec bude zhotoven z plastu. Dalším pádným důvodem byl problém týkající se celkových rozměrů modelu, musel by být vyroben na dva kusy (malý tiskový prostor tiskárny pro kovy).



Obr. 73 Orientační pevnostní analýza modelu rukojetě

Na obr. 73 lze vidět orientační pevnostní analýzu vytvořeného 3D modelu. Působící zatížení je záměrně navýšeno, aby vynikla kritická místa konstrukce. Nejslabšími bodem modelu je jednoznačně střed součásti. S ohledem na to, že mechanické vlastnosti dřeva a použitého plastu (polyamidu) se k sobě dosti přibližují (pevnost v tahu okolo 50 Mpa), není zde moc velký prostor pro provádění velkých topologických optimalizací, například s využitím bionických prvků. Ovšem nabízí se možnost aplikace těchto modifikací v místech uchycení ramene (horní a spodní část), ale v tomto místě dochází k velkým a opakovaným rázům, což většina plastových materiálů dobře nesnáší a hrozil by tu tak vznik defektu. Vzhledem ke zmíněným faktorům, bylo rozhodnuto, že na model budou aplikovány mikroprutové prvky. Minimálně ovlivní pevnost modelu, zároveň dojde k jeho odlehčení a poslední výhodou je zajímavá úprava designové stránky modelu.

Pro vytvoření mikrouprutové soustavy prvků, byl vybrán pracovní program s názvem Materialise Magics. Tento software umožňuje import široké řady formátů CAD a export souborů STL připravených pro Rapid Prototyping, obrábění a výrobu. Jeho aplikace zahrnují opravy a optimalizace 3D modelů nebo například analýzu dílů.

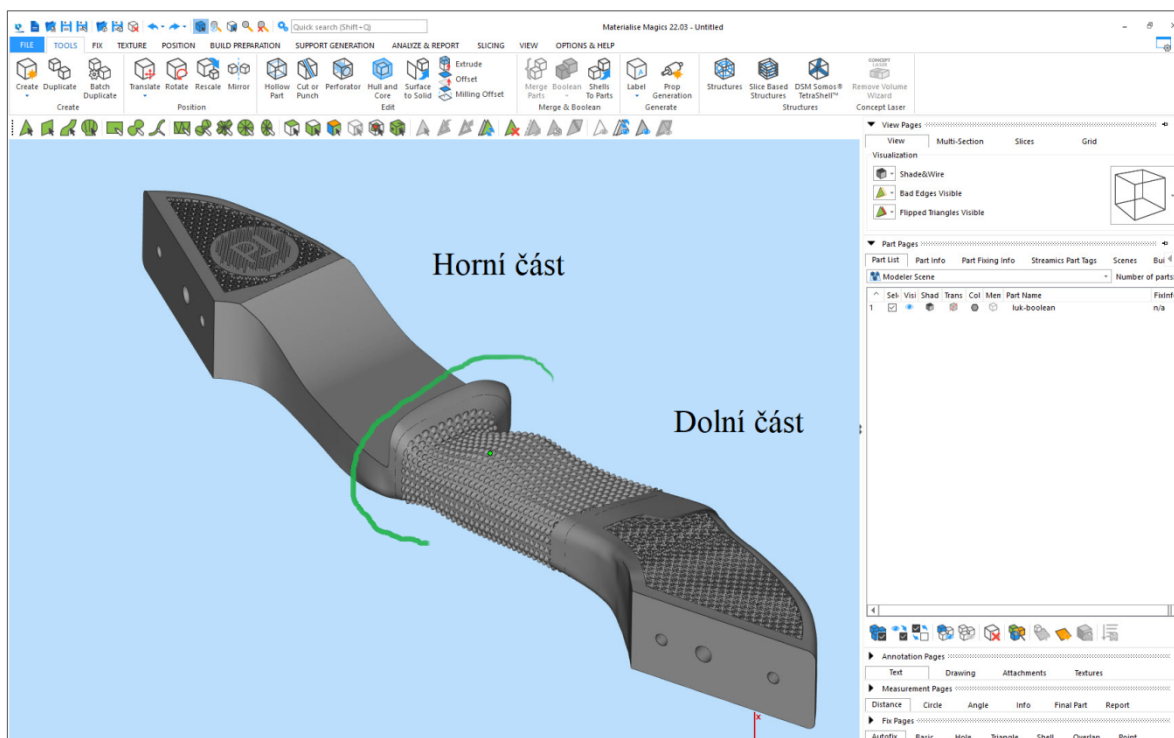


Obr. 74 Logo softwaru Materialise [31]

Před vlastní aplikací mikrouprutových prvků v programu Materialise Magics předcházela důkladná příprava modelu v systémovém prostředí programu SOLIDWORKS 2019. Vyráběný předmět se musel účelně rozčlenit do několika těl tak, aby do nich šlo posléze aplikovat v programu Materialise prvky mikrouprutové soustavy.

- Horní část tedy byla rozdělena na 5 těl (hlavní část, 3 části určené pro aplikaci mikrouprutové soustavy a poslední část je určena pro logo Protolabu)
- Spodní část byla rozdělena na 3 těla (hlavní část a 2 části určené pro aplikaci mikrouprutové soustavy)

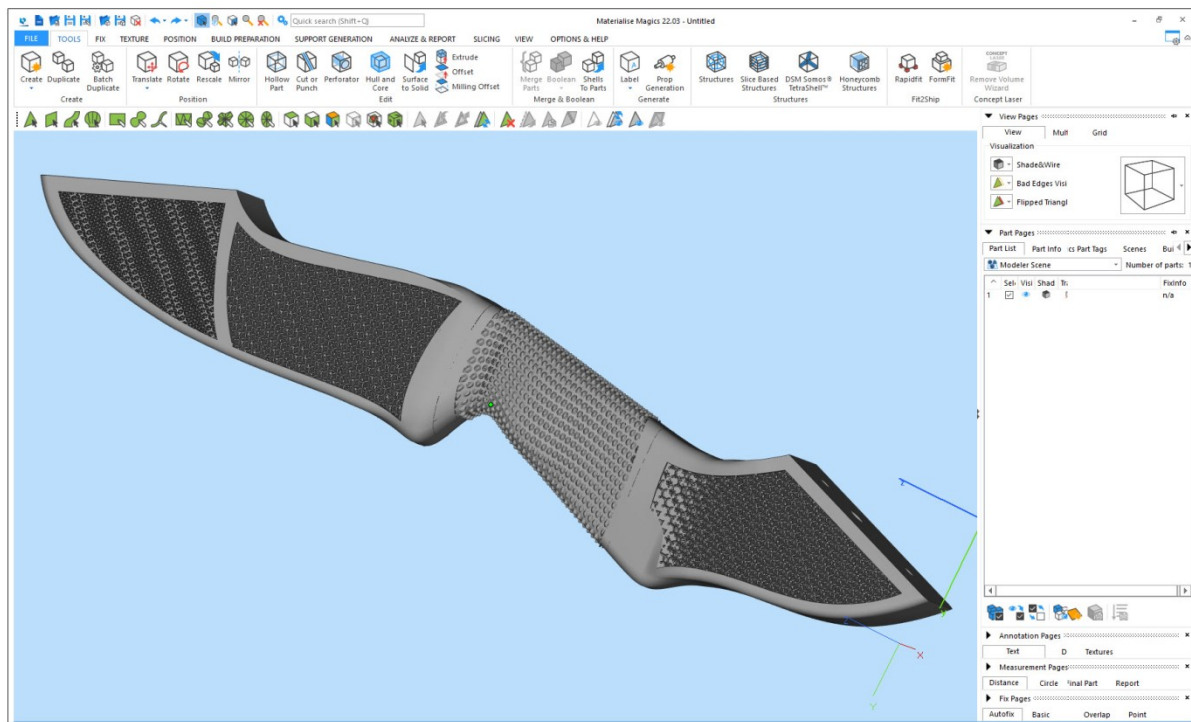
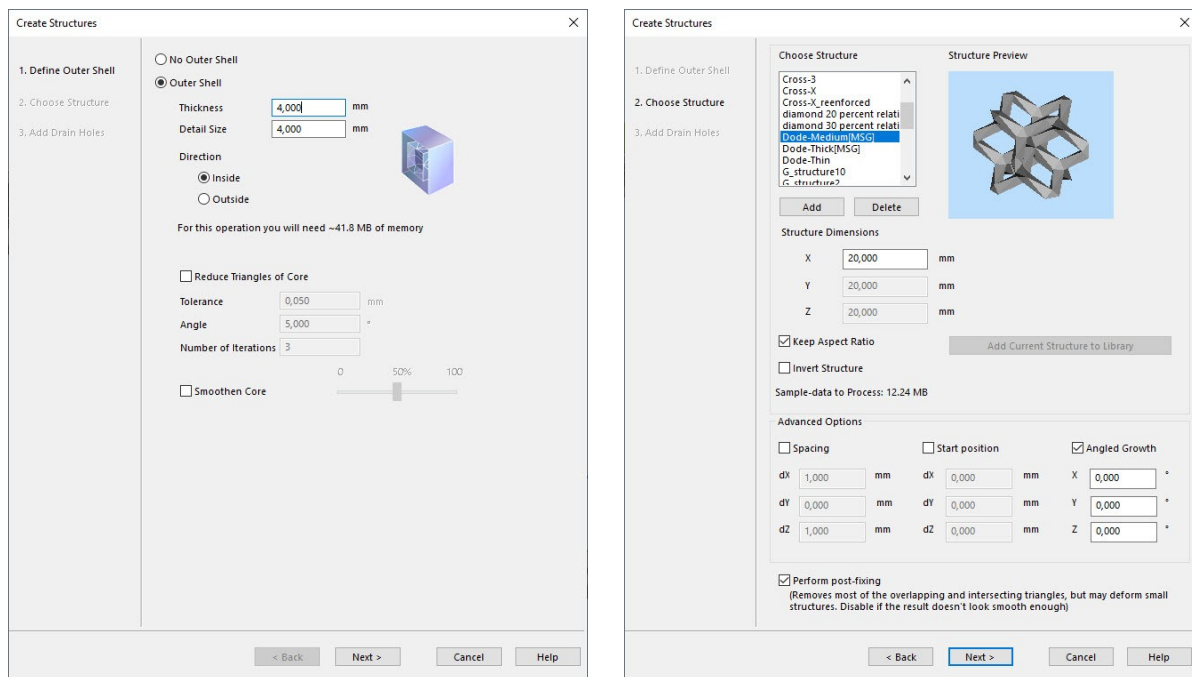
Po stanovení důležitých hranic pro výstavbu samotné mikrouprutové soustavy následoval export všech vytvořených těl do Formátu STL.



Obr. 75 Schéma základního rozčlenění modelu, aplikace mikrouprutové soustavy



Dalším krokem bylo importování vzniklých formátů STL do počítačového softwaru Materialise Magics. Tam byly následně aplikovány mikroprutové struktury. Na obr. 76 jsou zachyceny momenty týkající se samotného nastavení struktury mikroprutové matrice. Na model bylo aplikováno více druhů latti struktury, cílem bylo zjistit, jak se budou chovat (s ohledem na AV) a jak budou v praxi vypadat. Dále na obrázcích 75 a 76 lze sledovat výsledný stav modelu po aplikaci latti struktury.



Obr. 76 Obrázky z pracovního prostředí programu Materialise Magics, aplikace mikroprutových struktur

## 2.3 Vlastní proces tisku

Jak již bylo v kapitole 2.2.3 nastíněno, model bude zhotoven z plastového materiálu, a to pomocí technologie 3D tisku SLS (viz kap. 1.2.6). K tomu poslouží profesionální 3D tiskárna EOS P396 (nachází se na půdě strojní fakulty). Slouží k výrobě funkčních prototypů z polymerních materiálů, nabízí relativně vysokou produktivitu a kvalitu odvedené práce za cenu relativně nízkých nákladů. S celkovým pracovním prostorem o rozměrech 340 x 340 x 620 mm se řadí mezi tiskové stroje s rozsahem o středním objemu. Přehled základních údajů je uveden v tab. č. 1, další podrobné údaje jsou uvedeny v příloze č. 1.

Tab. 1 Přehled základních parametrů stroje EOS P396 [29]

Parametry:	Hodnoty:	Jednotky:
Max. rozměry součásti (X x Y x Z)	340 x 340 x 620	mm
Rychlost výroby (výškový nárůst)	22	mm/hod
Rychlost snímání	Až 2000	mm/s
Rychlost polohování	3000	mm/s
Tloušťka vrstvy	60 - 120	μm
Výkon laseru	50	W

Vzhledem k celkovým rozměrům vyráběné součásti 460 x 100 x 40 byl model orientován v pracovním prostoru tiskárny na výšku. Jako stavěcí materiál byl zvolen materiál s výrobním označením EOS PA2200, jedná se o polyamidový prášek vyniká především svými dobrými mechanickými vlastnostmi, podrobné informace o tomto materiálu jsou uvedeny v příloze č. 2. Celková doba tisku modelu činila 12 hodin.



Obr. 77 3D tiskárna EOS P396, model rukojetě luku po vyjmutí a očištění

## 2.4 Lakování

Výsledná drsnost povrchu modelů vytištěných metodou SLS obecně nabývá vyšších hodnot. Na dotek i vizuálně lze rozeznat jednotlivé nanesené vrstvy polyamidu. Konečný produkt tedy často disponuje zdrsňeným povrchem. Tento fakt se projevil i u tohoto modelu. Na obr. 78 lze vidět detailnější pohledy na vytištěný model.



Obr. 78 Detailní pohledy na vytištěný model

Aby bylo dosaženo lepší povrchové úpravy, bylo rozhodnuto, že vytištěný model bude lakován. Samotný proces lakování proběhl mimo půdu strojní fakulty, neboť proces povrchové úpravy je relativně náročný a vyžaduje určité zkušenost. Na základě těchto faktů, jsme tedy rozhodli oslovit lakovnu sídlící v sousedním městě Opava. Jedná se o umělecký ateliér vystupující pod názvem Airbrush studio Opava, provozovatelem je pan Obrtel. V minulosti již v tomto ateliéru proběhlo několik úspěšných zakázek pro strojní fakultu (týkající se AV). Byla tu tedy zaručena určitá kvalita odvedené práce.



Obr. 79 Prostředí Airbrush studia v Opavě, ukázka lakovaného předmětu



Prvním krokem při samotném lakování bylo odmaštění a následné zbrusnění samotného dílce, poté následovala aplikace tzv. plniče. Jedná se o nástřik, jenž má za úkol vyrovnat vzniklé nerovnosti povrchu a vytvořit tak jednolitou vrstvu. Plnič se nejčastěji aplikuje alespoň ve dvou fázích. První nástřik je hustějšího charakteru, druhý je naopak řidší, má za úkol nanést tenký jednolitý film. Na Obr. 80 lze vidět model po aplikaci poslední vrstvy plniče.



Obr. 80 Prostředí Airbrush studio Opava, ukázka lakovaného předmětu touto dílnou

Po vytvrdnutí plnicí vrstvy bylo nutné dílec znovu přebrousit a poté nanést barevný lak. Logo Protolabu uvedené na součásti bylo nutné vymalovat ručně. Proces lakování a jeho výsledky jsou zaznamenány na následujících obrázcích. Finální úpravou pak bylo nanesení bezbarvého laku.



Obr. 81 Finální stav produktu po nalakování



Obr. 82 Model po nanesení černé základové barvy



Obr. 83 Detailní pohled na ručně namalované logo ProtoLabu

## 2.5 Technické zhodnocení

Z hlediska vlastního provedení 3D tisku se jevil zhotovený výrobek velice dobře. Tisková přesnost stroje zaručila výrobu modelu s velice velkým smyslem pro drobné detaily. Prostory pro úchytový systém ramen luku byly vytisknuty správně. Nebylo je nutné nijak zásadně upravovat. Výjimku tvoří díry pro vložení kolíků, tam musel být uvízlý prášek odstraněn mechanicky menším vrtákem, avšak rozměrově byly zhotoveny správně.

Vlastní tisk mikroprutové soustavy dopadl také dle očekávání, bez větších závad. Problém tvoří pouze dvě části (pole), kde byly tyto prvky zakončeny nevhodným způsobem. Při vnějším kontaktu s nimi, hrozí že dojde k jejich vlastnímu poškození. Tento problém se dá vyřešit drobnou úpravou jejich orientace.

Tab. 2 Vlastnosti použitých materiálů

Materiál	Pevnost v tahu [MPa]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Dřevo; Javor	50-56	700 - 800
Plast; Polyamid PA 2200	48	900

Tab. 3 Srovnání dosažených výsledků

	Napětí von Misesse [MPa]	Objemová úspora [%]	Hmotnost [g]
Původní dřevěná konstrukce	29 MPa	-	2 636
Nový optimalizovaný model	34 MPa	9	2 555

V tabulce č. 1 jsou uvedeny základní vlastnosti použitých materiálů. Oba dva materiály se svými mechanickými vlastnostmi se k sobě poměrně dosti přibližují. Avšak dřevo má přece jen o něco lepší pevnost v tahu a nižší měrnou hustotu (nižší váha).

Porovnání výsledků původní dřevěné konstrukce a nově optimalizovaného modelu je naznačeno v tab. č. 3. U nově vytvořeného modelu bylo dosaženo objemové úspory materiálu o hodnotě 9 %. Dále došlo k nepatrnému snížení hmotnosti oproti původnímu návrhu konstrukce. Jako nevýhoda se na první pohled může zdát vyšší hodnota měřeného napětí von Misesse, avšak analýza u obou měřených modelů brala v potaz extrémní hodnoty, kterým by mohly být vystaveny. Výsledky měření odpovídající běžnému provozu nepřesáhly hodnotu vyšší než 20 MPa, což na bezpečný provoz luku bohatě postačí.



### 3 Závěr

---

Hlavním cílem práce bylo navrhnout reklamní předmět, jenž na sobě bude nést určité prvky topologické optimalizace. První část práce je tedy věnována především teoretickému rozboru této tematiky (problematika aditivní výroby, technologie 3D tisku, stavební materiály, vlastní proces tisku, optimalizace konstrukce, prvky topologické optimalizace a mnohé další). Druhá část práce je naopak zaměřena na praktickou stránku věci.

Pro aplikaci topologických prvků byl vybrán skládací luk, přesněji jeho rukojeť. Protože se jedná o předmět se sportovním využitím a přitahuje určitou pozornost, jevil se tak jako dobrá volba pro výrobu reklamního předmětem. Natahovací síla luku činí 45 Lb, tedy v přepočtu 19,5 kg. Touto hodnotou se řadí do kategorie zbraní se sportovním a loveckým využitím (je tu pracováno už s poměrně velkými silami).

S ohledem na celkové rozměry rukojetě (460 x 100 x 40) a rozměry pracovních prostorů 3D tiskáren, které jsou využívány na půdě strojní fakulty, bylo rozhodnuto, že výrobek bude zhotoven z plastového materiálu (poliamidu PA 2200), metodou SLS. Další možností bylo vyrobit model z práškového kovu, ale jak již bylo avizováno, tiskárna nedisponuje dostatečně velkým prostorem a její provoz je celkově nákladný.

Pevnostní charakteristiky původního modelu (dřeva) a plastového materiálu jsou si velice podobné. Na základě tohoto faktu bylo rozhodnuto, že provedené optimalizační zákroky nebudou příliš rozsáhlé, aby nebyla ohrožena funkčnost daného předmětu. Volba tedy padla na aplikaci mikroprutové soustavy. Ta nabízí především odlehčení konstrukce a zároveň funguje i jako zajímavý desingový doplněk.

Aplikace mikroprutových samotných prvků byla provedena za pomoci počítačových softwarů SOLIDWORKS 2019 a Materialise Magics. Vlastní tisk navrženého modelu pak proběhl na tiskovém stroji EOS P396. Porovnáme-li parametry původní modelu a nově vytvořeného, zjistíme, že tu došlo k určitým objemovým (9%) a váhovým (81g) úsporám. Potřebné pevnostní charakteristiky pro provoz luku byly zachovány.

Cena nákladů na vlastní tisk modelu byla vykalkulována přibližně na 8000 Kč. Doba tisku trvala 12 hodin. K těmto nákladům je dále nutné přičíst další částku, vztahující se k provedené povrchové úpravě (lakování 5000 Kč). Výsledná cena se může zdát na první pohled vysoká, ale je také nutné si uvědomit výhody a rozsáhlé možnosti aplikace dílů vytvořených kombinací právě aditivní výroby a topologické optimalizace. Nyní své uplatnění nalézají především ve špičkových oblastech automobilového, leteckého, či kosmonautického průmyslu, ale za několik pár let tomu může být jinak.

## 4 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

---

- [1] Citační software: CITACE PRO. *Citacepro.com* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://citacepro.com>.
- [2] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.
- [3] CHLEBO, Martin. *Budoucnost materiálů pro 3D tisk* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/štítky/historie-3d-tisku/>
- [4] KOVAČÍK, Miroslav. *Historie 3D tisku* [online]. 27.10.2017 [cit. 2019-05-5]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
- [5] ZETKOVÁ, Ivana. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem* [online]. 2017 [cit. 2019-05- 5]. Dostupné z: <file:///C:/Users/Libor/Documents/Zetkova.pdf>. Disertační práce. Vedoucí práce Jiří Česánek.
- [6] ZLOCH, Marek. *Vše o 3D tisku: Technologie* [online]. [cit. 2019-05-5]. Dostupné z: [www.marekzloch.cz/book/vse-o-3d-tisku-technologie.pdf](http://www.marekzloch.cz/book/vse-o-3d-tisku-technologie.pdf)
- [7] *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping* [online]. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI FAKULTA STROJNÍ, 2012 [cit. 2019-05-4]. Dostupné z: [http://www.kvs.tul.cz/download/rapid\\_prototyping/Přehled%20technik%20využívaných%20při%20Rapid%20Prototyping.pdf](http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/Přehled%20technik%20využívaných%20při%20Rapid%20Prototyping.pdf)
- [8] Aditivní technologie - metody Rapid Prototyping. *VUT: Fakulta strojního Inženýrství* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto\\_bak/cv\\_STV\\_04\\_Aditivni\\_technologie\\_metody\\_Rapid\\_Prototyping.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf)
- [9] PROCHÁZKA, Lukáš. *Rapid prototyping* [online]. SPŠ na Proseku [cit. 2019-05-4]. Dostupné z: [www.sps-prosek.cz/soubory/S/CAX/Rapid%20prototyping.pdf](http://www.sps-prosek.cz/soubory/S/CAX/Rapid%20prototyping.pdf)
- [10] HŘAVA, Jan. *3D tisk a jeho využití v technickém vzdělávání* [online]. [cit. 2019-05-14]. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce PaedDr. Petr Pexa, Ph.D.
- [11] VACULÍK, Martin. *Rapid prototyping* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16106/vaculik\\_2011\\_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16106/vaculik_2011_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [12] CAESS: ProTOp Features. *Center for Advanced Engineering Software and Simulations* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://caess.eu/site/docs/doc/Caess\\_ProTOp\\_Features.pdf](https://caess.eu/site/docs/doc/Caess_ProTOp_Features.pdf)

- [13] GUO, Nanan. *Additive manufacturing: technology, applications and research needs* [online]. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013ons [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11465-013-0248-8.pdf>
- [14] MAREK, Tomáš. *Základy Konstrukční Optimalizace* [online]. Praha, únor 2006: Ústav mechaniky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/zko.pdf>
- [15] ZHANG, Weihong, Jihong ZHU a Tong Gao. *Topology Optimization in Engineering Structure Desing* [online]. iSTE Press [cit. 2019-05-19]. ISBN 9781-178548-224-3.
- [16] YOONGSHENG, Liu. *Advances in Engeneering Sowtware: A survey of manufacturing oriented topology optimization methods* [online]. department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997816302174#fig0004>
- [16] VAVERKA, Ondřej. *Hybridná návrh dílů pro aditivní způsob výroby* [online]. , 12 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/108422049-Hybridni-navrh-dilu-pro-aditivni-zpusob-vyroby.html#>
- [17] *Studentské projekty: Výroba a testování topologicky optimalizovaných nosníků* [online]. Brno: VUT [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/projekty-a-zaverecne-prace/>
- [18] Základní rozdělení materiálů (filamentů) pro 3D tiskárny. *MIRO LUK* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.mioluk.cz/clanky-jake-je-zakladni-rozdeleni-materialu-filamentu-pro-3d-tiskarny-a-jake-jsou-v-nich-rozdily.html>
- [19] VAVERKA, Ondřej. *OPTIMALIZACE TĚHLICE FORMULE STUDENT PRO VÝROBU SLM TECHNOLOGIÍ* [online]. Brno [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: [http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1223/Vaverka\\_Ondrej\\_153331.pdf/](http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1223/Vaverka_Ondrej_153331.pdf/). VUT. Vedoucí práce Daniel Koutný.
- [20] ŠEDIVÝ, Jiří. *Topologická optimalizace a bionické konstrukce v aditivní výrobě* [online]. 2017, Ostrava [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117431/SED0096\\_FS\\_N2301\\_2303T002\\_20\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117431/SED0096_FS_N2301_2303T002_20_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y). VŠB – Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Vedoucí práce Ing. Marek Pagáč, Pd. D.
- [21] *Možnosti využití optimalizačních modulů v systému ANSYS*. Konstrukce, odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/moznosti-vyuziti-optimalizacnich-modulu-v-systemu-ansys/>
- [22] KOŽÍŠEK, Martin a Matouš LORENC. *Minikurz optimalizace* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www2.humusoft.cz/www/papers/comsol2018/optimalizace-v-cm.pdf>

- [23] Topologická optimalizace. *MŮJ SOLIDWORKS 2018: Magazín pro konstruktéry* [online]. [cit. 2019-05-19]. DOI: <https://www.mujsolidworks.cz/download/Mujsolidworks-18-02.pdf>.
- [24] CHLEBOUN, Jan. *Konstruování z hmoty a dř: Topologická a geometrická optimalizace* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1998/cislo-12/konstruovani-z-hmoty-der.html>
- [25] *Metoda SIMP pro optimalizaci topologie: DASSAULT SYSTEMES* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: [http://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/c\\_simp\\_method\\_topology.htm](http://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm)
- [26] *Topology Optimization Guide: Software list* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.topology-opt.com/software-list/>
- [26] PAGÁČ, Marek. *SOLIDWORKS 2019: Jak efektivně vytvořit 3D texturu* [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.mujsolidworks.cz/solidworks-2019-jak-efektivne-vytvorit-3d-texturu/>
- [27] *Material data sheet: EOS; PA 2200* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://www.shapeways.com/topics/udesign/materials/white\\_strong\\_flexible/pa2200\\_material\\_data\\_sheet\\_12\\_08\\_en\\_.pdf](http://www.shapeways.com/topics/udesign/materials/white_strong_flexible/pa2200_material_data_sheet_12_08_en_.pdf)
- [28] *EOS P396: Properties and Parameters* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://www.3rsystems.cz/files/tinymce/Zarizeni/EOS\\_System\\_Data\\_Sheet\\_EOS\\_P\\_396\\_EN\\_V7\\_Web.pdf](http://www.3rsystems.cz/files/tinymce/Zarizeni/EOS_System_Data_Sheet_EOS_P_396_EN_V7_Web.pdf)
- [29] *ProtoLab: Profesionální průmyslový 3D tisk v Ostravě* [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://protolab.cz>
- [30] *Materialy pro 3D tisk: Aditivní výroba* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/>
- [31] *Pinterest Social: Online databáze obrázků; klíčová slova pro vyhledávání: aditivní výroba, topologické prvky, práškové materiály, latti structure, bionic design, 3D print atd.* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.pinterest&hl=en\\_US](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.pinterest&hl=en_US)
- [32] JAŠEK, Adam. *Metody dokončovacích povrchových úprav 3D vytištěných plastových modelů* [online]. 2017 [cit. 2019-05-13]. VŠB – Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Marek Pagáč, Ph.D.
- [33] MIKULÍKOVÁ, Irena. *Bionika v architektuře* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/56761/6568\\_mikulikova.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/56761/6568_mikulikova.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

## 5 SEZNAM PŘÍLOH

---

- Příloha č. 1 Parametry tiskového stroje EOS P 396 <sup>[28]</sup>  
Příloha č. 2 Charakteristiky materiálů PA 2200 <sup>[27]</sup>
- 

### Příloha č. 1:





# EOS P 396: Cost-Effective Industrial Manufacture of Components – Highly Efficient, Reproducible and Reliable

With an effective build volume of 340 x 340 x 600 mm, EOS has managed to set standards in the medium frame Laser Sintering segment. This highly productive system delivers tool-free manufacture of serial components, spare parts, functional prototypes and models directly from CAD data.

## High productivity with low cost per part and homogeneous part properties

- Thanks to state-of-the-art software and hardware components, the build progress is on average 15% higher compared to its predecessor\* and the build time and cost per part are reduced significantly.
- The spot pyrometer accurately and continuously measures the temperature of the material layer to be exposed and allows an overall reduction of non-productive time down to 60%.
- With the low-wear, high-speed recoater, the material is applied faster with the same consistent precision, thus improving the build speed.
- The powerful 70 W laser helps to boost the build rate.
- With 12 commercial polymer materials and 22 combinations of materials/layer thicknesses currently available, EOS is a benchmark in terms of material variety. In addition, the EOS ParameterEditor allows customized exposure parameters to be defined based on proven starting values.
- The powder handling solutions IPCM P and IPCM P plus integrate the EOS P 396 system in a closed and traceable powder cycle and thus ensures dust-free and ergonomic working conditions.

## Technical data EOS P 396

Building volume	340 mm x 340 mm x 600 mm (13.4 x 13.4 x 23.6 in)
Laser type	CO <sub>2</sub> , 70 W
Build rate	up to 32 mm/h** (1.3 in/h); up to 3.7 l/h
Layer thickness (availability depending on material)	0.06 mm (0.00236 in), 0.10 mm (0.00394 in), 0.12 mm (0.00472 in), 0.15 mm (0.00591 in), 0.18 mm (0.00709 in)
Precision optics	F-theta-lens
Scan speed during build process	up to 6 m/s (19.7 ft/s)
Power supply	32 A
Power consumption	nominal 10 kW, typical 2.4 kW

## Dimensions (W x D x H)

System	1,840 mm x 1,175 mm x 2,100 mm (72.4 x 46.3 x 82.7 in)
Recommended installation space	min. 4.3 m x 3.9 m x 3.0 m (169.3 x 153.5 x 118.1 in)
Weight	approx. 1,060 kg (2,337 lb)

## Software

PSW 3.8, EOSAME, EOS ParameterEditor, EOS RP Tools, EOSTATE Everywhere

## Materials

PA 2200, PA 2201, PA 1101, PA 3200 GF, AluMide®, PA 2202 black, PA 1102 black, CarbonMide®, PrimeCast® 101, PrimePart® ST, PrimePart® FR (PA 2241 FR), PrimePart® PLUS (PA 2221)

## Optional accessories

IPCM P, IPCM P plus, Modular Unpacking- and Sieving Station, Industrial Vacuum Cleaner, Blasting System, Lift trolley, Sieving Machine, Unpacking Stand, Big Bag Emptying Station.

\* EOSINT P 395

\*\* typical build rate for PA 2200 for 120 µm (0.00472 in) layer thickness

EOS GmbH  
Electro Optical Systems  
Corporate Headquarters  
Robert-Stirling-Ring 1  
82152 Krailling/Munich  
Germany  
Phone +49 89 893 36-0  
Fax +49 89 893 36-285

## Further EOS Offices

EOS France  
Phone +33 437 49 76 76

EOS Greater China  
Phone +86 21 602307 00

EOS India  
Phone +91 44 39 64 80 00

EOS Italy  
Phone +39 02 33 40 16 59

EOS Korea  
Phone +82 2 63 30 58 00

EOS Nordic & Baltic  
Phone +46 31 760 46 40

EOS of North America  
Phone +1 248 306 01 43

EOS Singapore  
Phone +65 6430 05 50

EOS UK  
Phone +44 1926 67 51 10

[www.eos.info](http://www.eos.info) • [info@eos.info](mailto:info@eos.info)

Think the impossible. You can get it.



Status 09/2017. Technical data subject to change without notice. EOS is certified according to ISO 9001.  
EOS®, AluMide®, EOSTATE®, PrimeCast® and PrimePart® are registered trademarks of EOS GmbH in some countries.  
For more information visit [www.eos.info/trademarks](http://www.eos.info/trademarks)

## **Příloha č. 2:**

### **Material data sheet**



## **PA 2200**

### **1 General**

Typical applications of the material are fully functional parts with high end finish right from the process, which easily withstand high mechanical and thermal load.

PA 2200 is suitable for processing on the following systems:

- EOSINT P 730, P 700
- EOSINT P 390, P 385, P 380i, P 380, with or without powder conveying system  
EOSINT P 360 with upgrade S&P, P 350/2 with upgrade 99 and upgrade S&P
- FORMIGA P 100

### **2 Technical data**

#### **General material properties**

Average grain size	ISO 13320-11	56	µm
	Laser diffraction	2.20	mil
Bulk density	EN ISO 60	0.45	g/cm <sup>3</sup>
Density of laser-sintered part	EOS method	0.93	g/cm <sup>3</sup>
		58	lb/ft <sup>3</sup>

#### **Mechanical properties**

Tensile modulus	EN ISO 527	1700	MPa
	ASTM D638	247	ksi
Tensile strength	EN ISO 527	48	MPa
	ASTM D638	6962	psi

PA 2200  
AHO / 12.08

1 / 2

#### **EOS GmbH - Electro Optical Systems**

Robert-Stirling-Ring 1  
D-82152 Krailling / München  
Telephone: +49 (0)89 / 893 36-0  
Telefax: +49 (0)89 / 893 36-285  
Internet: [www.eos.info](http://www.eos.info)



## Material data sheet

Elongation at break	EN ISO 527	24	%
Elongation at break	ASTM D638	24	%
Flexural modulus	EN ISO 178	1500	MPa
	ASTM D790	217	ksi
Flexural strength	EN ISO 178	58	MPa
	ASTM D790	8412	psi
Charpy - Impact strength	EN ISO 179	53	kJ/m <sup>2</sup>
Charpy - Notched impact strength	EN ISO 179	4.8	kJ/m <sup>2</sup>
Izod - Impact strength	EN ISO 180	32.8	kJ/m <sup>2</sup>
Izod - Notched impact strength	EN ISO 180	4.4	kJ/m <sup>2</sup>
Ball indentation hardness	EN ISO 2039	78	N/mm <sup>2</sup>
Shore D - hardness	ISO 868	75	-
	ASTM D2240	75	-

The mechanical properties depend on the x-, y-, z-position and on the exposure parameters used.

### Thermal properties

Melting point	EN ISO 11357-1	172 - 180	°C
Vicat softening temperature B/50	EN ISO 306	163	°C
	ASTM D1525	325	°F
Vicat softening temperature A/50	EN ISO 306	181	°C
	ASTM D1525	358	°F

The data are based on our latest knowledge and are subject to changes without notice. They do not guarantee properties for a particular part and in a particular application.

© 2008 EOS GmbH – Electro Optical Systems. All rights reserved.